

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
15. Juli 2004 (15.07.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 2004/059271 A1

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: G01J 5/00,  
H01L 21/00

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2003/013387

(22) Internationales Anmeldedatum:  
28. November 2003 (28.11.2003)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
102 60 673.0 23. Dezember 2002 (23.12.2002) DE  
103 29 107.5 27. Juni 2003 (27.06.2003) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme  
von US): MATTSON THERMAL PRODUCTS GMBH  
[DE/DE]; Daimlerstrasse 10, 89160 Dornstadt (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): HAUF, Markus

[DE/DE]; Friedrich-Silcherstrasse 11, 89335 Ichenhausen  
(DE). MERKL, Christoph [DE/DE]; Leubeweg 64,  
89134 Blaustein (DE). STRIEBEL, Christoph [DE/DE];  
Staufenstrasse 32, 89160 Dornstadt (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (national): AE, AG, AL, AM, AT,  
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR,  
CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE,  
GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR,  
KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK,  
MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT,  
RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR,  
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (regional): ARIPO Patent (BW, GH,  
GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW),  
eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,  
TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,  
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL,  
PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI Patent (BF, BJ, CF, CG,  
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING THE TEMPERATURE OF A SEMICONDUCTOR WAFER IN A RAPID THERMAL PROCESSING SYSTEM

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM BESTIMMEN DER TEMPERATUR EINES HALBLEITERWAFERS IN EINER SCHNELHEIZANLAGE

(57) Abstract: The invention relates to a method for determining at least one state variable from a model of an RTP system by means of at least one test signal that is picked up from the RTP system, i.e. the test parameter which depends on the state variable that is to be determined, and a test parameter, i.e. the predicted value, which is predicted by means of the model, the test parameter and the predicted value each comprising a direct component and an alternating component. According to the inventive method, at least the alternating component is separately determined by means of filters in order to form a first difference between the alternating component of the test parameter and the alternating component of the test parameter, which is predicted by the model; at least one model parameter is adjusted by feeding the first difference back into the model so as to adjust the model behavior to variable system parameters; a second difference is formed from the test parameter and the predicted value or from the test parameter that is corrected by the alternating component and the corrected predicted value; a state of the model system is corrected by feeding the second difference back into the model in order to match the state of the model system with that of the real system; and the at least one state variable is picked up from the model.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Bestimmung wenigstens einer Zustandsvariablen aus einem Modell eines RTP-Systems mittels wenigstens eines am RTP-System abgegriffenen Messsignals, der Meßgröße, welche eine Abhängigkeit von der zu bestimmenden Zustandsvariablen aufweist, und eines mittels des Modells vorhergesagten Messgrößen, dem Vorhersagewert, wobei die Messgröße und der Vorhersagewert jeweils Komponenten eines Gleich- und Wechselanteils umfassen, und wobei jeweils wenigstens der Wechselanteil durch Filter getrennt ermittelt wird, um eine erste Differenz zwischen dem Wechselanteil der Messgröße und dem durch das Modell vorhergesagten Wechselanteil der Messgröße zu bilden, Parameteradaption von wenigstens einem Modellparameter durch Rückführung der ersten Differenz in das Modell mit dem Ziel, das Modellverhalten auf variable Systemparameter anzupassen, bilden einer zweiten Differenz aus Messgröße und Vorhersagewert oder aus dem Wechselanteil bereinigter Messgröße und bereinigtem Vorhersagewert, Zustandskorrektur eines Zustandes des Modellsystems durch Rückführung der zweiten Differenz in das Modell mit dem Ziel den Zustand des Modellsystems mit dem des realen Systems in Übereinstimmung zu bringen, und Abgreifen der wenigstens einen Zustandsvariablen am Modell.



---

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage

- 5 Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Bestimmung wenigstens einer Zustandsvariablen aus einem Modell eines RTP-Systems mittels wenigstens eines am RTP-System abgegriffenen Meßsignals, der Meßgröße, welche eine Abhängigkeit von der zu bestimmenden Zustandsvariablen aufweist. Insbesondere bezieht sich die vorliegende
- 10 Erfindung auf ein Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Objekts vorzugsweise eines Substrats wie z.B. eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage, bei der das Objekt bzw. das Substrat mit Strahlungsquellen erhitzt wird.
- 15 Schnellheizanlagen zum thermischen Behandeln von Substraten wie z.B. Halbleiterwafern sind bei der Halbleiterherstellung weitgehend bekannt. Sie werden zur thermischen Behandlung der Wafer eingesetzt, die vorzugsweise aus Silizium bestehen, die aber auch aus Verbindungshalbleitern wie z.B. II-VI, III-V und IV-IV Halbleitern bestehen können. Ein wichtiges Merkmal bei der
- 20 thermischen Behandlung der Halbleiterwafer in einer Schnellheizanlage ist eine genaue Steuerung bzw. Regelung der Wafertemperatur während der thermischen Behandlung. Diese Steuerung bzw. Regelung der Wafertemperatur erfordert wiederum eine genaue Bestimmung der Wafertemperatur während der thermischen Behandlung, um die
- 25 Schnellheizanlage entsprechend zu steuern bzw. zu regeln. Die vorliegende Erfindung bezieht sich speziell auf den Aspekt der Temperaturbestimmung eines Halbleiterwafers während seiner thermischen Behandlung in einer Schnellheizanlage. Allgemein bezieht sich die Erfindung auf die Bestimmung einer Zustandsvariable aus einem Modell eines RTP-Systems, welches mittels
- 30 Modellparameter den Zustand des RTP-Systems beschreibt.

Unterschiedliche Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage sind bekannt. Einerseits ist es bekannt, Thermoelemente an den Halbleiterwafern selbst und/oder in seiner

35 unmittelbaren Nähe anzubringen, um deren Temperatur zu ermitteln. Dabei

ergibt sich jedoch das Problem, daß die Thermoelemente einerseits eine aufwendige Anbringung an den Halbleiterwafern erfordern und andererseits zu lokalen Temperaturinhomogenitäten führen, da sie mit den Halbleiterwafern im allgemeinen in thermisch leitendem Kontakt stehen müssen und ferner das Strahlungsfeld in der Schnellheizanlage zumindest in der Nähe des Thermoelements beeinflussen.

Ein weiteres, kontaktloses Verfahren, das beispielsweise aus den auf die Anmelderin zurückgehende Patentanmeldungen und Patente DE-A-19852320, US 6,191,392 und US 6,396,363 bekannt ist, verwendet eine kontaktlose Temperaturmessung. Bei dieser kontaktlosen Temperaturmessung ist ein erstes Pyrometer vorgesehen, das auf eine Seite des Wafers gerichtet ist, um vom Wafer kommende Strahlung zu erfassen, die sowohl Wärmestrahlung des Wafers als auch am Wafer reflektierte Strahlung der Strahlungsquellen beinhaltet. Ferner ist ein zweites Pyrometer vorgesehen, das auf die Strahlungsquellen selbst gerichtet ist, um von den Strahlungsquellen ausgehende Strahlung, die mit einer Modulation versehen ist, zu erfassen. Die Modulation der Strahlungsquellen ist dabei derart gewählt, dass sie sich nicht in der Wärmestrahlung des Wafers niederschlägt, aber in der am Wafer reflektierten Strahlung der Strahlungsquellen meßbar ist. Anhand eines bestimmten Algorithmus läßt sich die am ersten Pyrometer gemessene Wärmestrahlung des Wafers von der am Wafer reflektierten Strahlung der Strahlungsquelle bis zu einem gewissen Grade trennen. Aus der Wärmestrahlung läßt sich dann die Temperatur des Wafers bestimmen.

Diese Art der Temperaturbestimmung erfordert jedoch zwei Pyrometer oder Detektoren, nämlich ein sogenanntes Waferpyrometer (oder allgemein einen Detektor zur Messung der vom Wafer emittierten und am Wafer reflektierten bzw. durch den Wafer hindurch transmittierten Strahlung) und ein Lampenpyrometer (bzw. ein zweites Meßsystem zur Erfassung der von den Lampen oder Strahlungsquellen emittierten Strahlung), die jeweils mit hohen Kosten verbunden sind. Darüber hinaus erfasst das Lampenpyrometer bzw. das zweite Meßsystem nicht nur von den Strahlungsquellen stammende Strahlung, sondern teilweise auch von dem Wafer stammende Strahlung, was eine genaue Temperaturermittlung des Halbleiterwafers erschwert und

zusätzliche Mittel zur genauen Bestimmung der Lampenstrahlung erfordert, wie dies in der auf die Anmelderin zurückgehenden Patentanmeldung DE-A-19852321 beschrieben ist. Zusätzliche Probleme ergeben sich bei hoher Dynamik des Schnellheizsystems hinsichtlich des Temperatur-Zeit-Verhaltens des Wafers. Werden z.B. hohe Aufheizraten des Wafers von über 250°C/sek. realisiert, so enthalten die Strahlungssignale der Heizstrahler wie auch die des Wafers Frequenzanteile im Bereich der Modulationsfrequenz. Dies hat i.a. eine Verfälschung des im Frequenzbereich ermittelten Amplitudenverhältnisses aus der von den Heizstrahlern emittierten und der vom Waferpyrometer gemessenen Strahlung zur Folge. Die hierdurch verursachten transienten Meßfehlern können die Stabilität und Performance des geregelten Systems unter hoher Dynamik mitunter stark beeinträchtigen. Die oben beschriebene kontaktlose Temperaturbestimmung mit Hilfe modulierter Strahlungsquellen eignet sich deshalb vorzugsweise für quasi-stationäre Systeme, d.h. für Systeme bzw. Temperatur-Zeit-Prozesse denen das System Schnellheizanlage-Wafer unterworfen wird, die quasi-stationär sind, d.h. im Vergleich zur Modulationsfrequenz der Strahlungsquellen sich zeitlich nur langsam ändern. Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Sensorempfindlichkeit, bzw. aus den Anforderungen hinsichtlich Meßgenauigkeit, da die Beiträge der modulierten Strahlung sehr genau zu ermitteln sind, denn mittels dieser erfolgt eine in-situ Emissivitäts- und/oder Transmissivitätsbestimmung des Objekts (des Wafers).

Ausgehend von dem oben genannten Stand der Technik liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage, bei der das Substrat mit einer Strahlungsquelle erhitzt wird, vorzusehen, das auf einfache und kostengünstige Weise eine gute Temperaturbestimmung des Halbleiterwafers ermöglicht. Ferner liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine Zustandsvariable eines RTP-Systems zu bestimmen, wobei speziell die Zustandsvariable die Temperatur eines Halbleiterwafers in der Schnellheizanlage sein kann.

Erfindungsgemäß weist das Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Objekts (vorzugsweise eines Substrats wie z.B. eines Halbleiterwafers) in

einer Schnellheizanlage, bei der das Objekt (z.B. ein Halbleiterwafer) mit Strahlungsquellen (z.B. Heizstrahlern) erhitzt wird, das Erfassen einer Ansteuergröße der Strahlungsquellen, das Erfassen einer Messgröße, die stark von der zu bestimmenden Zustandsgröße eines Objekts in der Schnellheizanlage abhängt, bzw. eine hinreichende Abhängigkeit von der zu bestimmenden Zustandsgröße wie z.B. der Temperatur des Objekts (z.B. des Halbleiterwafers) aufweist, das Bestimmen eines Vorhersagewerts dieser Messgröße des wenigstens einen Objekts über ein Systemmodell der Schnellheizanlage einschließlich Halbleiterwafer (Objekt), das mit der Ansteuergröße der Strahlungsquellen beaufschlagt wird, das Bestimmen einer Zustandskorrektur (in dieser Anmeldung auch als Regelgröße bezeichnet) für das Systemmodell aus der Differenz zwischen der erfassten Messgröße und dem Vorhersagewert der Meßgröße und das Bestimmen wenigstens einer Zustandsvariablen eines Zustands des Halbleiterwafers bzw. eines Zustandes des Systems aus Halbleiterwafer und Schnellheizanlage anhand des Systemmodells und der Zustandskorrektur auf, wobei das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße wenigstens teilweise anhand der bestimmten Zustandsvariablen erfolgt.

Nach dem Einschwingen der Zustandskorrektur ist der Modellzustand in sehr guter Übereinstimmung mit dem Systemzustand. Das Modell repräsentiert also den Zustand des realen Systems weshalb der zu bestimmende Systemzustand, wie z.B. die Wafertemperatur direkt aus dem Systemmodell abgegriffen werden kann.

Dieses Verfahren ermöglicht auf einfache und kostengünstige Weise das Bestimmen wenigstens einer Zustandsvariablen eines Zustandsvektors, der vorzugsweise den Zustand des Systems aus Halbleiterwafer und Schnellheizanlage beschreibt, wobei die zeitliche Entwicklung des Systemzustandes sowie dessen Reaktion auf die Ansteuergröße durch ein Systemmodell beschrieben wird, das vorzugsweise mehrere Teilmodelle umfaßt, in das einerseits wenigstens eine Ansteuergröße der Schnellheizanlage wie z.B. eine Ansteuergröße der Strahlungsquellen, und andererseits wenigstens eine bestimmte Zustandskorrektur eingeht. Im allgemeinen handelt es sich bei Schnellheizanlagen um Systeme, bei denen

die unterschiedliche Komponenten mit verteilten Systemparametern und Systemzuständen wie z.B. der Emissivität und der Temperatur miteinander in einem komplexen thermischen Wechselwirkungsverhältnis stehen. Die vollständige Beschreibung des realen Systems würde deshalb eine sehr große Zahl von Systemparametern und eine genaue Kenntnis der Details aller thermischen Wechselwirkungen bedingen. Schon aus Gründen der Echtzeitanforderungen sind vollständige Modellbeschreibungen deshalb im allgemeinen nicht realisierbar, weshalb es sich bei den Systemmodellen vorzugsweise um auf die für die korrekte Darstellung der Dynamik der interessierenden Zustandsvariablen wesentlichen Eigenschaften des thermischen Systems reduzierten Modelle handelt.

Wenn man annimmt, dass der Anfangszustand des Systemmodells und des realen Systems exakt gleich ist, das Systemmodell das dynamische Verhalten des realen Systems exakt abbildet und keine Störgrößen auf das reale System einwirken, so würden sich die Zustände des Systemmodells und des realen Systems bei gleicher Ansteuergröße immer gleich entwickeln. Diese Annahmen sind jedoch nicht realistisch und daher wird das Systemmodell um eine Regelung ergänzt. Die Ausgangsvariablen (Meßgrößen) der Regelstrecke (reales System) werden mit denen des Systemmodells (Beobachter) verglichen und Differenzen dazwischen wirken über einen Regler auf den Zustand des Beobachters zurück. Über diese Zustandskorrektur (die Rückwirkung der Differenz zwischen Vorhersagewerte und Meßwerte auf den Zustand und/oder die Parameter des Beobachters wird innerhalb dieser Anmeldung auch als Regelgröße oder Regelparameter bezeichnet) wird der Zustand des Beobachters an den des realen Systems angepasst, indem der Regler die Differenz zwischen den jeweiligen Ausgangsgrößen minimiert. Je kleiner die Differenzen, desto besser stimmen zumindest die beobachtbaren Zustandsvariablen des Beobachters mit denen der Regelstrecke (des realen Systems) überein. Ist nun die Temperatur eines Halbleiterwafers eine solche beobachtbare Zustandsvariable, so kann sie direkt aus dem Systemmodell entnommen bzw. hieraus abgegriffen werden.

Oder anders ausgedrückt, wird zur Zustandskorrektur die Differenz zwischen Vorhersagewert und Meßwert bzw. die Rückwirkung der Differenz auf den

## 6

Zustand bzw. die Parameter des Beobachters als Regelgröße oder Regelparameter zur Anpassung des Beobachters, d.h. des Systemmodells, bezeichnet, so wird die Regelgröße (oder Regelparameter) durch einen Algorithmus ermittelt, der eine erfaßte Meßgröße eines Objekts in der Schnellheizanlage mit einem Vorhersagewert der Messgröße des Objekts vergleicht und darauf gerichtet ist, die Differenz zwischen diesen zwei Werten zu minimieren. Desto kleiner die Differenz, desto besser beschreibt die anhand des Modells bestimmte Zustandsvariable den tatsächlichen Zustand des Systems aus Halbleiterwafer (Objekt) und Schnellheizanlage, und damit auch den Zustand des Objekts (Halbleiterwafers), wodurch sich neben anderen Variablen dieses Zustandes insbesondere die Temperatur des Objekts bzw. des Halbleiterwafers bestimmen läßt.

Allgemein kann man das dynamische Verhalten eines Systems über eine Zustandsgleichung beschreiben, wobei der Zustandsvektor  $x$  aus einer oder mehreren Zustandsvariable zusammengesetzt ist. Der Zustandsvektor  $x(t)$  entwickelt sich zeitlich, wobei die zeitliche Entwicklung im allgemeinen mittels eines Systems aus Differentialgleichungen beschrieben wird. Durch geeignete Transformation lassen sich die Differentialgleichungen auf die allgemeine Form der Zustandsgleichung  $\dot{x} = f(x(t), u(t))$  überführen, wobei  $\dot{x}$  die zeitliche Ableitung,  $u(t)$  der Eingangsvektor eines Systems ist, der im Falle von geregelten Systemen i.a. stark zeitabhängig ist, und  $f$  eine im allgemeinen vektorwertige Funktion ist. Derartige Zustandsvariablen beschreiben auch den Zustand bzw. die Zustände eines Systemmodells, z.B. des Systemmodells aus RTP-System und Objekt (Halbleiterwafer, Substrat). Systeme bzw. Systemmodelle sind ferner durch Parameter charakterisiert, wobei sich die Systemparameter im allgemeinen nicht zeitlich entwickeln, bzw. es kann für die Systemparameter keine explizite zeitliche Abhängigkeit angegeben werden. Dennoch bestimmen die Parameter das Übertragungsverhalten des Systems bzw. des Systemmodells, d.h. die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen. Parameter sind z.B. Emissivität, Transmissivität und Reflektivität des Halbleiterwafers im Systemmodell RTP-System-Halbleiterwafer, während z.B. Wafer- und Strahlungsquellentemperatur (Lampentemperatur) Zustandsvariablen sind.



Der Zustand des Systems aus Objekt und Schnellheizanlage bzw. des Objekts wird wie oben dargestellt im allgemeinen durch einen Zustandsvektor der die Zustandsvariable enthält beschrieben.

- 5 Das Verfahren zur Bestimmung einer Zustandsvariablen aus einem Modell eines RTP-Systems mittels wenigstens eines am RTP-System abgegriffenen Meßsignals, der Meßgröße, welche eine Abhängigkeit von der zu bestimmenden Zustandsvariablen aufweist, umfaßt erfindungsgemäß eine mittels des Modells vorhergesagte Meßgröße, den Vorhersagewert, wobei
- 10 Meßgröße und Vorhersagewert jeweils Komponenten eines Gleich- und Wechselanteils umfassen, und wobei jeweils wenigstens der Wechselanteil durch Filter getrennt ermittelt wird, um eine erste Differenz zwischen dem Wechselanteil der Meßgröße und dem durch das Modell vorhergesagten Wechselanteil der Meßgröße zu bilden, eine Parameteradaption von
- 15 wenigstens einem Modellparameter durch Rückführung der ersten Differenz in das Modell mit dem Ziel, das Modellverhalten auf variable Systemparameter anzupassen, bilden einer zweiten Differenz aus Meßgröße und Vorhersagewert oder aus um den Wechselanteil bereinigter Meßgröße und bereinigtem Vorhersagewert, Zustandskorrektur eines Zustandes des
- 20 Modellsystems durch Rückführung der zweiten Differenz in das Modell mit dem Ziel, den Zustand des Modellsystems mit dem des realen Systems in Übereinstimmung zu bringen und Abgreifen wenigstens einer Zustandsvariablen am Modell.
- 25 Vorzugsweise repräsentiert die Zustandsvariable die Temperatur des Halbleiterwafers oder eine andere Größe, aus der auf eindeutige Weise die Temperatur des Halbleiterwafers abgeleitet werden kann.

Der besondere Vorteil der obigen erfindungsgemäßen Verfahren liegt darin,

30 dass lediglich ein Sensor z.B. ein Pyrometer zum Erfassen einer Meßgröße erforderlich ist, um dann den Zustand des Systems aus Objekt (Halbleiterwafer) und Schnellheizanlage so zu bestimmen, daß z.B. der Zustand des Objekts hinsichtlich seiner Temperatur und/oder etwaige optische Eigenschaften bestimmt werden können, die apriori unbekannte

35 Systemparameter sind, wie z.B. Emissivität, Transmittivität und/oder

Reflektivität. Anders ausgedrückt, der besondere Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahren liegt darin, dass lediglich ein Sensor z.B. ein Pyrometer zum Erfassen einer Meßgröße erforderlich ist, um a priori unbekannte Systemparameter wie Emissivität, Transmittivität und/oder Reflektivität des Halbleiterwafers zu bestimmen, indem das Systemmodell durch Parameteranpassung (Parameteradaption) in möglichst gute Übereinstimmung mit der Regelstrecke (dem realen System) gebracht wird, und die Zustandskorrektur zu ermöglichen, mit der die Zustände von Beobachter und Regelstrecke in Übereinstimmung gebracht werden. Durch den Modellabgleich der optischen Eigenschaften bleiben die Zustände des Systemmodells und der Regelstrecke auch dann konsistent, wenn sich die optischen Eigenschaften des Halbleiterwafers verändern (man spricht von variablen Systemparameter, wie z.B. die Reflektivität, Transmissivität und Emissivität des Halbleiterwafers, denn diese Parameter sind temperaturabhängig und damit, bei zeitabhängiger Temperatur des Halbleiterwafers implizit zeitabhängig), wodurch auch die von einer Zustandsvariablen abgeleitete Temperatur nahe an der realen Temperatur in der Regelstrecke liegt. Ein Bestimmen der Lampen- oder Strahlungsquellenintensität mittels eines weiteren Detektors, wie es beispielsweise in der zuvor genannten DE-A-198 52 320 beschrieben ist, kann somit entfallen und damit stellen die erfindungsgemäße Verfahren eine erhebliche Vereinfachung hinsichtlich Meßgenauigkeit und des meßtechnischen Aufwandes und eine deutliche Verbesserung der Robustheit, Zuverlässigkeit und Driftstabilität dar. Ferner erlaubt die vorliegende Erfindung auch bei hoher Systemdynamik, d.h. bei z.B. hohen Aufheiz- und/oder Abkühlraten des Wafers und insbesondere bei niedrigen Wafertemperaturen eine nahezu störungsfreie Temperaturbestimmung, was Voraussetzung für die zuverlässige Regelung der Schnellheizanlage und somit der Temperatur des Halbleiterwafers ist, da etwaige Frequenzkomponenten (Fourierkomponenten), welche aus der Systemdynamik resultieren, auch in den Vorhersagewerten des Modells des erfindungsgemäßen Verfahrens enthalten sind. Dies bedeutet, dass auch unter starker Systemdynamik Vorhersagewerte und Messwerte konsistent bleiben und folglich die durch die Systemdynamik verursachten zusätzlichen Frequenzanteile nicht als Störung interpretiert werden müssen. Hierdurch sind diese Komponenten von der

tatsächlichen Modulationsfrequenz der Strahlungsquellen wie z.B. der Lampen separierbar, wodurch die Störanfälligkeit und die Leistungsfähigkeit der Schnellheizanlage insbesondere bei hohen Aufheizraten erheblich verbessert wird. Aufheizraten von bis zu 500°C lassen sich heute bereits im Labor und teils im Bereich der Massenproduktion der Chipherstellung zuverlässig realisieren. Das erfindungsgemäße Verfahren kommt also vorzugsweise mit einem Pyrometer (oder Strahlungsdetektor) zur Messung der Waferstrahlung aus, da Informationen wie z.B. die Strahlungsquellenintensität (z.B. der Lampenstrahlung) aus dem Modell bereitgestellt werden. Damit aber z.B. die Strahlungsquellenintensität mit ausreichender Genauigkeit aus dem Modell entnommen werden kann, bedarf es einer hinreichend genauen Modellierung der Heizstrahler. Ist eine hinreichend genaue Modellierung der Heizstrahler nicht möglich, so kann die Strahlungsquellenintensität z.B. mittels eines weiteren Strahlungsdetektors bestimmt werden, z.B. mittels eines Pyrometers welches direkt die Strahlungsquellenintensität mit hinreichender Genauigkeit ermittelt, z.B. mittels der Anwendung geeigneter Blendenmittel, wie sie z.B. in der auf die Anmelderin zurückgehenden Patentanmeldung DE 19852321 beschrieben sind. Die Strahlungsquellenintensität kann aber auch z.B. über eine Messung einer mit der Intensität der Strahlungsquelle in Beziehung stehenden Größe ermittelt werden, wobei sich dann die Strahlungsquellenintensität mittels geeigneter Konversionsdaten ergibt. Anstelle der Konversionsdaten kann die Strahlungsquellenintensität auch mit Hilfe eines Beobachters oder eines adaptiven Beobachters, welcher ein Strahlungsquellenmodell umfaßt, gewonnen werden. Dabei dient die gemessene Größe zur Zustandskorrektur des Strahlungsquellenzustandes und/oder zur Parameteradaption von Parameter des Strahlungsquellenmodells. Fig. 8 zeigt schematisch die Beziehung zwischen einer Eingangsgröße  $u(t)$  und einer gemessenen Größe  $y(t)$  zur Bestimmung der Strahlungsquellenintensität. Ein Eingangssignal  $u(t)$  wird auf einen Regler 200 (controller) gegeben, welcher die Strahlungsquellen 220 z.B. Lampen (lamps) entsprechend dem Eingangssignal regelt. Zwischen Regler und Strahlungsquellen befindet sich eine Treiber 210 (driver), der für die entsprechende Leistung zum Betrieb der Strahlungsquellen entsprechenden der Eingangsgröße  $u(t)$  sorgt. Die Strahlungsquellen, z.B. Halogenlampen, strahlen dann breitbandig die Intensität  $I_{BB}$  ab, wobei ein Teil

der Strahlung auf den Wafer 230 gelangt. Der Wafer wird dadurch erhitzt und mittels des Waferpyrometers wird dann z.B. ein schmalbandiges Signal  $I_{NB}$  ermittelt, welches zur Ermittlung der Wafertemperatur dient. Wird die Strahlungsquellenintensität nicht mittels einer hinreichend genauen Modellierung der Heizstrahler unter ausschließlicher Verwendung des Eingangssignals  $u(t)$  bestimmt, so können wie oben erwähnt, weitere gemessene Größen  $y(t)$  wie z.B. Lampenspannung  $V$  und/oder Lampenstrom  $I$  und/oder Lampenstrahlungsintensität (breitbandig  $I_{BB}$  und/oder schmalbandig  $I_{NB}$ ) zur Bestimmung der Strahlungsquellenintensität dienen, wobei diese gemessenen Größen  $y(t)$  wie erwähnt auch zum Abgleich eines Strahlungsquellenmodells verwendet werden können, aus dem dann die Strahlungsquellenintensität erhalten wird.

Beim Verfahren zur Bestimmung einer Zustandsvariablen erfolgt vorzugsweise die Rückführung der ersten Differenz über eine erste Bewertungsfunktion und einen ersten Regelalgorithmus und/oder die Rückführung der zweiten Differenz über eine zweite Bewertungsfunktion und einen zweiten Regelalgorithmus. Die Bewertungsfunktionen geben dabei ein Maß für die Übereinstimmung von gemessenem und vorhergesagtem Signal wieder. Der Regelalgorithmus bestimmt dann, wie die jeweilige Differenz unter Berücksichtigung der Bewertungsfunktion auf das Modell Einfluß nimmt, d.h. wie die Zustände und/oder Parameter des Modells verändert werden, um die Zustandskorrektur und/oder Parameteradaption zu erreichen, so daß Vorhersagewert und Meßwert möglichst gut übereinstimmen. Um Abweichungen niedriger Frequenz effektiver kompensieren zu können ist es oft vorteilhaft neben proportionalen Korrekturen mittels Rückführungsmatrizen auch Integratoren in den Rückführungszweigen einzusetzen. Das Bestimmen einer Differenz und deren Rückführung in das Systemmodell zur Zustandskorrektur bzw. zur Parameteradaption wird innerhalb dieser Anmeldung allgemein auch als das Bestimmen einer Regelgröße bezeichnet, mit der auf die Modellzustände bzw. Modellparameter Einfluß genommen wird. Der Begriff Regelgröße ist also diesbezüglich gegenüber dem in der Regelungstechnik gebräuchlichen Begriff „Regelgröße“, welche eine mittels eines Reglers zu regelnde Systemausgangsgröße meint, erweitert.

In einer weiteren vorzugsweisen Ausführungsform des Verfahrens zur Bestimmung einer Zustandsvariablen aus einem Modell eines RTP-Systems mittels wenigstens eines am RTP-System abgegriffenen Meßsignals, ist das RTP-System eine Schnellheizanlage mit der ein Objekt, vorzugsweise ein Halbleiterwafer, mit Strahlungsquellen (Heizstrahler wie z.B. Halogenlampen) erhitzt wird, und/oder das Modell wenigstens ein im RTP-System erhitztes Objekt, beispielsweise wenigstens einen Halbleiterwafer umfaßt und ein Systemmodell bildet. Ein derartiges RTP-System wird üblicherweise als Cold-Wall-Reactor bezeichnet, da die Erwärmung des Wafers (Objekts) im wesentlichen über Strahlungsenergie der Heizstrahler erfolgt und die Wand des RTP-Systems kalt in dem Sinne ist, daß die Temperatur der Wand wesentlich geringer ist als die Temperatur des Wafers.

Allgemein kann das RTP-System jedoch auch ein Hot-Wall-Reactor sein, bei dem sich die Wand des RTP-Systems, bzw. die Prozeßkammer in welcher sich das zu prozessierende Objekt (z.B. der Wafer) befindet, üblicherweise auf einer höheren Temperatur als das zu erwärmende Objekt befindet.

Vorzugsweise umfaßt das RTP-System unterschiedliche Heizstrahler welche jeweils mittels einer Ansteuergröße angesteuert werden, wobei vorzugsweise die Heizstrahler (oder allgemein die Strahlungsquellen) zu deren Modulation der abgestrahlten Strahlungsintensität mittels der Ansteuergröße mit unterschiedlichen Modulationsparameter angesteuert werden, um mehrere Modellparameter des Systemmodells auf eindeutige Weise zu adaptieren, wie beispielsweise die Transmissivität oder Reflektivität eines Wafers. Denn vorzugsweise berücksichtigt das Systemmodell mittels Modellparameter die optischen Eigenschaften des Wafers, wobei dann die optischen Eigenschaften des Wafers in dem Systemmodell an die realen optischen Eigenschaften des Wafers in der Schnellheizanlage angeglichen werden. Die Heizstrahler können dabei auch in Gruppen zusammengefaßt werden, wobei dann die jeweiligen Gruppen mit jeweils einer Ansteuergröße angesteuert werden.

Die Modulation der Strahlungsquellen (z.B. Heizstrahler) kann auch durch eine kontinuierliche, nicht notwendigerweise periodische Anregung erzielt werden bzw. dargestellt werden, z.B. können diese generierte Anregungen

durch pseudo random Sequenzen (random Anregungen) oder farbiges Rauschen verursacht werden, wobei diese Sequenzen bzw. das Rauschen gezielt auf die Stellgröße der Heizstrahler (oder im allgemeinen auf die Strahlungsquelle oder die Strahlungsquellen) eingespeist werden. Die nichtperiodischen Anregungen können aber auch durch parasitär im System (also z.B. durch Störungen) auftretende Anregungen entstehen, welche auf die Stellgröße der Heizstrahler wirken. Auch in diesen Fällen ist durch die vorliegende Erfindung eine vernünftige Parameteradaption möglich.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst die Messgröße wenigstens eine vom Halbleiterwafer kommende Wärmestrahlung, die durch einen Strahlungsdetektor, vorzugsweise ein Pyrometer, erfasst wird. Die Wärmestrahlung kann allerdings auch auf andere Weise ermittelt werden wie z.B. mittels eines in einem definiert zum Wafer beabstandeten Thermoelements, das eine durch die Wärmestrahlung verursachte Temperaturänderung z.B. einer geschwärzten Fläche misst. Ein Pyrometer ermöglicht eine genaue Bestimmung der Strahlungsintensität und arbeitet berührungslos. Dabei umfasst das durch das Pyrometer erfasste Strahlungssignal wenigstens einen Anteil der von einem Messbereich auf dem Halbleiter emittierten Wärmestrahlung des Wafers sowie am Wafer reflektierte Strahlung der Strahlungsquellen und abhängig vom Wafermaterial und der Wafertemperatur durch den Wafer hindurch transmittierte Strahlung. Vorzugsweise weist die Strahlung der Strahlungsquellen eine Modulation auf, die eine Unterscheidung zur direkten Wärmestrahlung des Wafers erlaubt. Damit ist es möglich die am Wafer reflektierte Strahlung und/oder die durch den Wafer hindurch transmittierte Strahlung mittels Modulationsparameter der Strahlungsquellenmodulation zu identifizieren, wie dies z.B. in den auf die Anmelderin zurückgehenden Patenten US 6,191,392 und US 6,396,363 näher beschrieben ist, wobei im vorliegenden Verfahren, wie bereits erwähnt, eine meßtechnische Erfassung der Strahlungsquellenintensität entfallen kann. Bei Verwendung von modulierten Strahlungsquellen (Heizstrahler) umfaßt die Meßgröße einen wesentlich von den optischen Eigenschaften des Wafers abhängigen Wechselanteil der durch die Modulation der Strahlungsquellen erzeugt wird, womit dann eine Angleichung der optischen Eigenschaften (vorzugsweise Emissivität und/oder Transmissivität und/oder Reflektivität)

durch einen Algorithmus erfolgen kann, welcher den Wechselanteil in der erfaßten Meßgröße und in der durch das Systemmodell vorhergesagten Meßgröße durch Adaption der optischen Eigenschaften des Wafers (Objekts) im Systemmodell angleicht.

5

Alternativ oder zusätzlich zur obigen Ausführungsform umfaßt die Meßgröße eine von einem Gegenstand kommende Strahlung z.B. berührungslos mittels eines Pyrometers und/oder die Meßgröße erfaßt die Temperatur oder eine mit der Temperatur des Gegenstandes in Beziehung stehende Meßgröße durch direkte Berührung z.B. mittels eines Thermoelements. Dabei steht der Gegenstand mit dem Objekt, dem Halbleiterwafer, derart in Beziehung, daß eine Temperaturänderung des Objekts (Halbleiterwafers) sich in einer Temperaturänderung bzw. in einer Änderung der Meßgröße des Gegenstandes derart auswirkt, so daß z.B. mittels eines Modells und/oder einer Funktion aus der Kenntnis des Zustandes (z.B. Temperatur oder einer mit der Temperatur in Beziehung stehenden Meßgröße oder der Meßgröße) des Gegenstandes auf die Temperatur und/oder den Zustand des Objekts (Wafers) geschlossen werden kann. Der Gegenstand kann z.B. ein zweiter Wafer oder eine „Abdeckplatte“ sein, wobei diese etwas vom Wafer beabstandet über und/oder unter dem eigentlichen Wafer angebracht ist, wie dies in der auf den Anmelder zurückgehenden US 6,051,512 oder in US 6,310,328 dargestellt ist. Der Gegenstand kann ferner z.B. ein Bereich der Prozeßkammer, ein in der Nähe einer Objekt- bzw. Waferseite befindliche wenigstens einen Teil der Waferstrahlung reflektierende Fläche, ein Bereich einer Quarzscheibe (z.B. die Teil einer Quarzprozesskammer ist) die in der Nähe des Objekts angeordnet ist oder ein zusätzlich in die Prozesskammer eingebrachter Gegenstand sein, der sensitiv auf etwaige Temperaturänderungen und/oder auf die Temperatur des Wafers (Objekts) hinsichtlich seiner Meßgröße reagiert. Vorzugsweise umfaßt das RTP-System auch bei dieser Ausführungsform wenigstens eine Heizvorrichtung welche bezüglich Ihrer abgegebenen Wärmeenergie moduliert ist, und wobei die Meßgröße an einem Objekt ermittelt wird, welches aufgrund seiner thermischen Eigenschaften (wie z.B. thermische Masse) und/oder seiner thermischen Kopplung an die modulierte Heizvorrichtung (z.B. Strahlungsquelle) bezüglich seiner Temperatur der Modulation der

10

15

20

25

30

35

Heizvorrichtung nur unwesentlich folgt, d.h. z.B., dass ein relativer Parameter (wie z.B. eine Modulationsamplitude dividiert durch die Amplitude des Gesamtsignals) für die Temperaturmodulation am Objekt weniger als etwa 25%, vorzugsweise weniger als 10% oder gar weniger als 1% des gleichen relativen Parameters für die Modulation der Heizvorrichtung ist. Vorzugsweise  
5 umfaßt oder ist das Objekt ein Halbleiterwafer, eine wenigstens einen Halbleiterwafer wenigstens teilweise umgebende Umhüllung (z.B. eine Graphitbox, wie sie aus den auf die Anmelderin zurückgehende Patente US5,837,555, US 5,872,889 und der Patentanmeldung DE 101 56441 bekannt  
10 sind, bzw. eine Box wie sie in PCT/IB99/01946 beschrieben wird), eine Kammerwand (oder ein Teil einer Kammerwand) einer Prozeßkammer des RTP-Systems oder allgemein ein Gegenstand in der Nähe eines Halbleiterwafers. Vorzugsweise wird die Meßgröße mittels eines Pyrometers und/oder Thermoelements erfaßt und die ermittelte Zustandsvariable des  
15 Zustands ist die Temperatur des Objekts und/oder die Temperatur des Halbleiterwafers, wobei vorzugsweise die Meßgröße am Halbleiterwafer und/oder an einem Gegenstand in der Nähe des Halbleiterwafers ermittelt wird. Ebenfalls werden bevorzugt die optischen Eigenschaften des Objekts wie z.B. die Reflektivität, die Transmissivität und/oder die Emissivität im  
20 Modell als Modellparameter berücksichtigt.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung umfasst das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße das Bestimmen eines Vorhersagewerts der Waferstrahlung, der einen durch die Waferstrahlung  
25 bewirkten Anteil am Pyrometersignal vorhersagt, d.h. den Anteil der Waferstrahlung im Bereich des Meßflecks auf dem Wafer, der zum Meßsignal des Strahlungsmeßgerätes beiträgt. Da das erfasste Signal sowohl einen Strahlungsanteil vom Wafer als auch Strahlungsanteile der Strahlungsquellen, d.h. der Heizstrahler umfasst, ist für eine eindeutige Zustandskorrektur die  
30 Trennung von Wafer- und Heizstrahleranteil vorteilhaft. Die Zustandsrekonstruktion oder in anderen Worten die korrekte Interpretation stützt sich hierbei auf Modellvorhersagen beider Strahlungsanteile. Dabei umfasst die Vorhersage des Signalanteils des Wafers vorzugsweise das Bestimmen eines Intensitätswerts der Wärmestrahlung des Wafers im Bereich  
35 einer Messwellenlänge des Pyrometers anhand der ermittelten



Zustandsvariablen und einer ermittelten Emissivität des Wafers. Vorzugsweise wird anschließend der Vorhersagewert der Waferstrahlung anhand eines Modells unter Berücksichtigung des zuvor ermittelten Intensitätswert der Waferstrahlung im Bereich der Messwellenlänge des  
5 Pyrometers und einer ermittelten Emissivität des Wafers bestimmt. Somit lässt sich der durch den Wafer bewirkte Anteil am Pyrometersignal vorteilhafterweise vorhersagen. Dabei berücksichtigt das Modell einen Einfluss der Kammer auf die effektive Emissivität des Wafers, da die Kammergeometrie und Reflektivität der Kammerwände scheinbar  
10 emissivitätserhöhend wirken können.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung umfasst das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße neben dem Bestimmen des Wafer-Vorhersagewerts ferner das Bestimmen eines Lampen-  
15 Vorhersagewerts (Strahlungsquellen-Vorhersagewerts) bzw. allgem. eines Vorhersagewerts der am Strahlungsmeßgerät erfassten Strahlung der Strahlungsquellen welche bevorzugt Lampen wie z.B. Halogenlampen beliebiger Form, Blitzlampen und/oder Bogenlampen beliebiger Form oder Laserlichtquellen sind. Allgemein können Strahlungsquellen auch heiße  
20 Flächen wie z.B. erhitzte Platten sein. Der Lampen-Vorhersagewert bzw. Strahlungsquellen-Vorhersagewert sagt einen durch die Strahlungsquellen bewirkten Anteil am Pyrometersignal oder Detektorsignal vorher. Hierdurch läßt sich ein insbesondere durch Reflexion und/oder Transmission am Wafer bewirkter Anteil der von den Strahlungsquellen stammenden Strahlung am  
25 Pyrometersignal vorhersagen, wobei hierzu adaptierte Parameter der Reflektivität/Transmissivität des Wafers verwendet werden. Dabei umfasst das Bestimmen des Lampen-(Strahlungsquellen-) Vorhersagewerts aufgrund der Wechselwirkung zwischen Wafer und Strahlungsquellen (Lampen) vorzugsweise das Bestimmen eines Breitband-Intensitätswerts der  
30 Wärmestrahlung des Wafers anhand der ermittelten Zustandsvariable (z.B. der Wafertemperatur) unter Berücksichtigung einer Emissivität des Wafers. Zur Verbesserung der Genauigkeit der Modellvorhersage können allgemein die Strahlungswechselwirkungen oder andere Wärmekopplungsmechanismen, wie z.B. Wärmekonvektion und/oder Wärmeleitung zwischen verschiedenen  
35 Objekten (z.B. Lampen, Wafer, Quarzelemente innerhalb der Prozeßkammer

oder die Prozeßkammer oder Teile davon) berücksichtigt werden. Vorzugsweise umfasst das Bestimmen des Lampen-Vorhersagewerts ferner das Bestimmen eines Intensitätswerts für die Strahlungsquellen anhand eines Lampenmodells bzw. Strahlungsquellenmodells und der Ansteuergröße der Strahlungsquellen. Da die Zustände der Heizstrahler nicht ausschließlich von deren Stellgröße abhängen sondern auch allgemein über breitbandige Strahlungswechselwirkungen miteinander verkoppelt sind, ist es vorteilhaft, Wechselwirkungen unterschiedlicher Heizstrahler mit zu berücksichtigen, um die Genauigkeit der Vorhersage der Zustände der Heizstrahler zu verbessern. Dabei berücksichtigt das Lampen- bzw. Strahlungsquellenmodell vorzugsweise Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Strahlungsquellen untereinander und/oder mit dem Wafer, in dem der Breitband-Intensitätswert der Wärmestrahlung des Wafers in die Eingangsgröße des Lampen-Strahlungsquellenmodells eingeht. Ferner berücksichtigt das Lampenmodell vorzugsweise Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Strahlungsquellen wie z.B. zwischen den Lampen einer aus mehreren Lampen bestehenden Lampenbank. Sowohl der Halbleiterwafer als auch die unterschiedlichen Strahlungsquellen untereinander besitzen Wechselwirkungen auf den jeweiligen Intensitätswert einer Strahlungsquelle. Dabei wirken sich die Wechselwirkungen immer zeitverzögert auf den Intensitätswert einer Strahlungsquelle aus. Die Strahlungswechselwirkungen bewirken neben dem über die Stellgröße definierten Leistungseintrag einen zusätzlichen Leistungseintrag, der wie die Stellgröße die zeitliche Entwicklung des Strahlerzustands bestimmt. Durch Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen z.B. im Lampen- bzw. Strahlungsquellenmodell lassen sich besonders genaue Intensitätswerte für die einzelnen Strahlungsquellen voraussagen.

Da mit diesem Verfahren bestimmte Temperaturwerte des Halbleiterwafers zur Regelung der Temperatur herangezogen werden sollen, sind alle Berechnungen in Echtzeit, vorzugsweise mit festen Zeitschritten durchzuführen. Um den Echtzeitanforderungen gerecht zu werden ist es deshalb vorteilhaft die erforderliche Rechenleistung zu minimieren. Um das Modell für die Lampen bzw. Strahlungsquellen zu vereinfachen und die erforderliche Rechenleistung zu reduzieren, sind die Strahlungsquellen daher vorzugsweise als Gruppen zusammengefasst und das Bestimmen des

Intensitätswerts erfolgt für die jeweiligen Gruppen. Dabei erfolgt die Bestimmung des Intensitätswerts für die jeweiligen Gruppen anhand wenigstens eines, vorzugsweise jedoch wenigstens zweier Repräsentanten der Gruppe, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Dabei werden die

5 Strahlungsquellen vorzugsweise wenigstens innerhalb einer Gruppe mit derselben Ansteuergröße angesteuert.

Beim Bestimmen des Lampen- (Heizstrahler-) Vorhersagewerts wird vorzugsweise ein Modell verwendet, das den am Wafer reflektierten und

10 gegebenenfalls durch den Wafer transmittierten Anteil der Lampenstrahlung, der in das Gesichtsfeld des Pyrometers fällt vorhergesagt, und zwar anhand des bestimmten Intensitätswerts der Strahlungsquellen und einer ermittelten Emissivität des Wafers. Dabei ermittelt das Modell vorzugsweise die Reflektivität und gegebenenfalls die Transmissivität des Wafers anhand der

15 ermittelten Emissivität, um den reflektierten und transmittierten Anteil der Lampenstrahlung zu bestimmen. Ferner berücksichtigt das Modell vorzugsweise die Kammergeometrie, um auch mehrfach Reflexionen zu berücksichtigen.

20 Vorzugsweise wird der Vorhersagewert der Messgröße durch Addieren des Wafer-Vorhersagewerts und des Lampen- (Strahlungsquellen-) Vorhersagewerts gebildet, die zusammen das Messsignal des Pyrometers vorhersagen sollen. Dabei beinhaltet der Vorhersagewert der Waferstrahlung im Wesentlichen einen Gleichanteil des Vorhersagewerts der Messgröße und

25 der Lampen-Vorhersagewert im Wesentlichen einen Gleichanteil sowie einen Wechselanteil des Vorhersagewerts der Messgröße. Der Wechselanteil des Vorhersagewerts der Messgröße ergibt sich im Wesentlichen aus der Modulation der Strahlung der Strahlungsquellen und dem Anteil der am Wafer reflektierten, von den Strahlungsquellen stammenden Strahlung, die eine

30 Unterscheidung der beiden Signale ermöglichen soll.

Vorzugsweise wird für die Ermittlung der Emissivität des Wafer wenigstens teilweise der Vorhersagewert der Messgröße herangezogen. Dabei wird der Vorhersagewert der Messgröße vorzugsweise gefiltert, um dessen

35 Wechselanteil zu ermitteln, der im Wesentlichen dem modellierten Anteil der

von den Strahlungsquellen stammenden und am Wafer reflektierten Strahlung entspricht. Zum Ermitteln der Emissivität des Wafers wird vorzugsweise ein adaptiver Algorithmus eingesetzt, der den Wechselanteil (z.B.  $>1\text{Hz}$ ) des Vorhersagewerts der Messgröße und einen vom Pyrometer erfassten Wechselanteil der vom Halbleiter kommenden Strahlung (die von wenigstens einem Meßfleck auf dem Halbleiterwafer herrührt) abgleicht. Da dieser Adaptionalgorithmus nur die Wechselanteile vergleicht gelingt die Adaption unabhängig vom Zustand des realen Systems und des Systemmodells. Daher beeinflussen sich der Adaptionalgorithmus und die Zustandskorrektur nicht gegenseitig.

Für eine Homogenisierung der Wafertemperatur in der Schnellheizanlage wird dieser vorzugsweise relativ zu den Lampen bzw. Strahlungsquellen in Rotation versetzt, wobei die Rotation (Drehung) einen Wechselanteil der von dem Halbleiterwafer kommenden Strahlung, beispielsweise durch Inhomogenitäten auf der Wafer- (Objekt- oder Substrat-) oberfläche, bzw. Inhomogenitäten (optische Fluktuationen, d.h. Inhomogenitäten hinsichtlich Transmission und/oder Reflexion) auf einer mitrotierenden Waferauflagevorrichtung (Waferträger) welcher den Wafer haltet und ihn gegebenenfalls in Rotation versetzt, erzeugen kann. Dieser Wechselanteil wird für die Ermittlung eines guten Emissivitätswerts, also zur Parameteranpassung des Modells, und/oder im Modell zur Ermittlung einer Zustandsvariablen des Wafers und/oder der Schnellheizanlage (z.B. bei der Bestimmung von Zustandsvariablen wie z.B. der Rotationsgeschwindigkeit und/oder der Rotationsphase) berücksichtigt. Vorzugsweise wird wie oben beschrieben die ermittelte Emissivität anschließend skaliert, bevor sie anderen Prozessen zugeführt wird, um eine Kompatibilität hinsichtlich der verwendeten Werte vorzusehen.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird der Halbleiterwafer in dem Modell zum Ermitteln der Zustandsvariable als sogenannter black body angesehen, so dass eine Emissivitätsermittlung für das Ermitteln der Zustandsvariable nicht notwendig ist, und das Modell lediglich die Ansteuergröße der Strahlungsquellen, sowie die bestimmte Zustandskorrektur benötigt, um die Zustandsvariable zu ermitteln.

Die bei der vorliegenden Erfindung eingesetzten Modelle können auf physikalischen Modellen beruhen, d.h. die Modelle beschreiben die tatsächlich zugrundeliegenden physikalischen Effekte möglichst genau, oder  
5 sie können empirisch sein, d.h. z.B. mittels einer Systemübertragungsfunktion beschreiben werden. Eine Beschreibung der Modelle mittels neuronaler Netze kann ebenfalls vorteilhaft sein. Ferner kommen vorzugsweise mehrere Teilmodelle zum Einsatz, die erst in ihrer Gesamtheit und mittels ihrer gegenseitigen Wechselwirkung ein Gesamtmodell des Systems Objekt  
10 (Substrat) und Schnellheizanlage bilden.

Die vorliegende Erfindung wird nachfolgend anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert:

15 In der Zeichnung zeigt:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Schnellheizanlage, bei der das erfindungsgemäße Verfahren eingesetzt werden kann;

20 Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Teils der Schnellheizanlage gemäß Fig. 1, in der der Einfallswinkel oder Öffnungswinkel eines Strahlungssensors und der Einfluss unterschiedlicher Elemente in der Schnellheizanlage auf das gemessene Signal des Strahlungssensors dargestellt ist;

25 Fig. 3 eine schematische Darstellung einer Temperaturregelung in einer RTP-Anlage;

Fig. 4 ein Blockdiagramm, das ein Ablaufdiagramm zur Bestimmung einer Wafertemperatur in einer Schnellheizanlage zeigt;

Fig. 5 eine schematische Darstellung eines Teilaspektes bei der Ermittlung der Wafertemperatur in einer Schnellheizanlage;

30 Fig. 6 eine schematische Darstellung eines weiteren Teilaspektes bei der Ermittlung der Wafertemperatur in einer Schnellheizanlage;

Fig. 7 eine schematische Darstellung von Funktionsblöcken eines Lampenmodells, das bei der Ermittlung der Wafertemperatur in einer Schnellheizanlage verwendet wird und

Fig. 8 eine schematische Darstellung der Beziehung zwischen einer Eingangsgröße  $u(t)$  und einer Meßgröße  $y(t)$ .

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer Schnellheisanlage 1 für die thermische Behandlung eines Halbleiterwafers 2.

Die Schnellheisanlage 1 besitzt ein Gehäuse 4 bestehend aus einer oberen Wand 6, einer unteren Wand 7 und einer dazwischen angeordneten Seitenwand 8. Die Wände 6, 7 und 8 bilden gemeinsam eine Kammer 10. Die Kammer 10 ist durch zwei Quarzplatten 12 in einen oberen Kammerbereich 14, einen mittleren Kammerbereich 15 und einen unteren Kammerbereich 16 unterteilt. In den oberen und unteren Kammerbereichen 14, 16 sind jeweils eine Vielzahl von Strahlungsquellen 18 in der Form von Halogenlampen vorgesehen. Alternativ oder zusätzlich können auch andere Strahlungsquellen, wie beispielsweise Bogenlampen, Blitzlampen oder Laser vorgesehen sein, wobei die Strahlungsquellen eine hohe Dynamik besitzen, um ein rasches Aufheizen des Wafers 2 zu ermöglichen. Die Quarzplatten 12 sind im Wesentlichen für die Strahlung der Strahlungsquellen 18 durchlässig.

Der mittlere Kammerabschnitt 15 bildet eine Prozesskammer 15 in der der Wafer 2 über eine geeignete, nicht näher dargestellte Halteeinrichtung aufgenommen ist. Die Halteeinrichtung kann eine Rotationsvorrichtung zur Rotation des Wafers 2 umfassen, die in der Lage ist, den Halbleiterwafer 2 innerhalb der Prozesskammer zu drehen, d.h. den Wafer relativ zu den Strahlungsquellen zu rotieren. Im Bereich der Prozesskammer weist die Seitenwand 8 eine Eingabe-/Ausgabeöffnung 20 zum Be- und Entladen des Halbleiterwafers 2 auf. Die Eingabe-/Ausgabeöffnung 20 ist über einen geeigneten, nicht näher dargestellten Mechanismus, verschließbar. Vorzugsweise aber nicht notwendigerweise ist der Eingabe-/Ausgabeöffnung 20 gegenüberliegend in der Seitenwand 8 eine Gaseinlassöffnung 22 zum Einleiten eines Gases in den mittleren Kammerabschnitt 15, d.h. den Prozesskammerabschnitt, vorgesehen.

Innerhalb der Prozesskammer 15 ist ferner vorzugsweise ein Kompensationsring 24 vorgesehen, der in der Lage ist, während der

thermischen Behandlung auftretende Randeffekte hinsichtlich Temperaturverteilung über den Wafer, zu kompensieren.

Vorzugsweise ist in der unteren Gehäusewand 7 eine Öffnung zum Einführen  
5 eines Strahlungsmessgerätes 26, insbesondere eines Pyrometers, vorgesehen. Das Pyrometer 26 besitzt ein auf den Wafer 2 gerichtetes Blickfeld, das mit einer gestrichelten Linie in Fig. 1 dargestellt ist. Das Blickfeld ist derart angeordnet und besitzt einen derartigen Öffnungswinkel, dass direkt von den Strahlungsquellen stammende Strahlung nicht in das  
10 Blickfeld des Pyrometers 26 fällt, oder eine derartige Strahlung durch das Pyrometer nur in sehr reduziertem Maße erfaßt wird. Jedoch kann am Wafer 2 reflektierte Strahlung der Strahlungsquellen in das Blickfeld des Pyrometers 26 fallen, wie schematisch in Fig. 2 mittels des Strahls C dargestellt ist.

15 Fig. 2 zeigt schematisch einen Teilbereich der Schnellheizanlage 1, und insbesondere unterschiedliche Strahlungskomponenten, die in das Blickfeld (alpha) des Pyrometers 26 fallen. Zunächst fällt direkt vom Wafer 2 stammende Wärmestrahlung in das Blickfeld des Pyrometers, sofern sie von einem Punkt im direkten Blickfeld des Pyrometers 26 stammt, wie durch den  
20 Pfeil A in Fig. 2 dargestellt ist. Ferner fällt Wärmestrahlung des Wafers 2 in das Blickfeld des Pyrometers 26, die an der unteren Kammerwand 7 und am Wafer 2 selbst reflektiert wird, wie durch den gestrichelten Pfeil B dargestellt ist.

25 Darüber hinaus fällt auch von den Strahlungsquellen 18 stammende Strahlung in das Blickfeld des Pyrometers, in dem sie am Wafer 2 reflektiert wird, wie durch den Pfeil C dargestellt ist. Natürlich sind unterschiedliche Reflexionsmuster zu den dargestellten möglich, so dass unterschiedliche Strahlungsanteile sowohl vom Wafer als auch von den Strahlungsquellen in  
30 das Blickfeld des Pyrometers fallen. Bei einer Darstellung in Fig. 2 wird davon ausgegangen, dass der Wafer 2 für die Strahlung der Strahlungsquellen 18 im Wesentlichen undurchsichtig ist. Wenn dies nicht der Fall ist, kann auch von den oberen Strahlungsquellen 18 stammende Strahlung durch den Wafer 2 hindurch in das Blickfeld des Pyrometers 26 fallen.

Um eine Unterscheidung zwischen der Wärmestrahlung des Wafers 2 und der am Wafer 2 reflektierten Strahlung der Strahlungsquellen 18 zu ermöglichen, weist die Strahlung der Strahlungsquellen 18 eine Modulation auf. Dabei ist die Modulation derart gewählt, dass die Wärmestrahlung des Wafers 2 dieser  
5 Modulation nicht folgt. Um zwischen am Wafer reflektierter und durch den Wafer hindurch transmittierter Strahlung zu unterscheiden, können oberhalb und unterhalb vom Wafer angeordnete Strahlungsquellen unterschiedliche Modulationsarten wie Modulationsfrequenz und/oder Modulationsphase aufweisen.

10 Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung einer Temperaturregelung einer Schnellheizanlage, die eine Temperaturbestimmung gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet.

15 In Fig. 3 ist die Schnellheizanlage, die auch als RTP-Anlage (Rapid Thermal Processing-Anlage) bezeichnet wird, durch den Block 30 dargestellt. Aus dem Block 30 geht ein Sensorsignal zu einem Block 32, in dem eine Temperaturbestimmung gemäß der vorliegenden Erfindung stattfindet. Das Sensorsignal ist vorzugsweise das Signal des Pyrometers 26, das sowohl  
20 einen Wechselanteil als auch einen Gleichanteil beinhaltet. Bei opakem Wafer stammt der Wechselanteil im Wesentlichen ausschließlich aus der am Wafer reflektierten Lampenstrahlung, während der Gleichanteil sowohl aus der Wärmestrahlung des Wafers als auch der am Wafer reflektierten Lampenstrahlung stammt. Ein opaker Wafer liegt bei Siliziumwafern etwa bei  
25 Temperaturen über 600°C vor, so dass etwaige durch den Wafer transmittierte Strahlung z.B. von einer Strahlungsquelle oberhalb des Wafers nicht mehr relevant ist.

30 Im Block 32 erfolgt eine Temperaturbestimmung des Wafers durch das nachfolgend noch näher beschriebene Verfahren. Die ermittelte Temperatur, welche die tatsächliche Temperatur des Wafers ( $T_{ist}$ ) bestmöglich repräsentieren soll wird an eine Steuereinheit im Block 34 weitergeleitet. Die Steuereinheit im Block 34 vergleicht die Isttemperatur ( $T_{ist}$ ) mit einem eingehenden Temperatursollwert ( $T_{soll}$ ) und regelt anhand des Vergleichs die  
35 Ansteuerleistung der Lampen in der Schnellheizanlage 30. Hierzu wird an die



einzelnen Lampen z.B. eine effektive Spannung ( $U_{\text{eff}}$ ) angelegt. Die Steuereinheit im Block 34 kann einen beliebigen Regler, wie beispielsweise einen PID-Regler oder einen modellbasierten Regler, der eine Vorwärtssteuerung beinhaltet, aufweisen. Jedenfalls wird der Wert des Ansteuersignals  $U_{\text{eff}}$  von der Steuereinheit im Block 34 auch an den Block 32 weitergeleitet, um für die Temperaturbestimmung eingesetzt zu werden. Die Temperaturbestimmung im Block 32 wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 4 bis 7 näher erläutert.

Fig. 4 zeigt in Blockdiagrammform die derzeit bevorzugte Ausführungsform eines Temperaturermittlungsverfahrens.

Die eigentliche Temperaturermittlung erfolgt im Block 40. Im Block 40 wird die Wafertemperatur anhand eines statischen Kammermodells, das ein Modell der Kammer, das wenigstens ein Modell der Kammereigenschaften, vorzugsweise ein Modell der in der Kammer befindlichen Objekte, vorzugsweise z.B. ein Wafermodell und optional ein Lampen- bzw. Strahlungsquellenmodell, beinhaltet. Zur Vereinfachung der jeweiligen Modelle werden vorzugsweise wenigstens teilweise idealisierte Parameter für die einzelnen Modelle verwendet. So wird der Wafer im Wafermodell beispielsweise als schwarzer Strahler oder sogenannter Black Body mit einer Emissivität von eins angesehen. Als Eingangsgröße für die Ermittlung der Wafertemperatur dient die an die Gesamtheit der Lampen angelegte effektive Spannung ( $U_{\text{eff-Lampen-komplett}}$ ), die beispielsweise von der Steuereinheit 34 gemäß Fig. 3 in dem Block 40 eingespeist wird. Die ermittelte Wafertemperatur wird ferner anhand einer Zustandskorrektur(Regelgröße)  $Z$  angepasst. Diese Zustandskorrektur kann als eine Art Regelkreis aufgefasst werden, da aus gemessenen und durch das Modell (den Beobachter) vorhergesagten Werten analog einem Soll-Istwertvergleich eine Differenz bzw. ein Korrekturwert ermittelt wird, wobei die Stellgröße eines Reglers der Zustandskorrektur entspricht. Alternativ oder zusätzlich zu der an den Lampen bzw. Strahlungsquellen angelegten effektiven Spannung kann jeder Strahlungsquellenparameter dienen der geeignet ist, Aussagen über die von der Strahlungsquelle abgestrahlte Energie zu machen. So können z.B. auch

der Strom oder gar direkt gemessene Strahlungsgrößen, durch welche die Strahlung der Strahlungsquellen ermittelbar sind, gewählt werden.

Die Zustandskorrektur (Regelgröße)  $Z$  wird wiederum im Block 42 bestimmt und sie ist proportional zu einer Differenz zwischen einem gemessenen Waferpyrometersignal  $(DC + AC)_{\text{kompl.-gem.}}$  und einem vorhergesagten Waferpyrometersignal  $(DC + AC)_{\text{kompl.-vorh.}}$ . Der Block 42 kann als sogenannter P-Regler ausgelegt sein, wobei die Korrektur dann proportional zum Fehler wäre. Um niederfrequente Restfehler zu kompensieren kommt jedoch in der Regel wenigstens ein I-Regler hinzu. Natürlich kann der Regler auch als ein PID-Regler ausgeführt sein. Das gemessene Waferpyrometersignal entspricht dem vom Block 30 an den Block 32 gelieferten Sensorsignal gemäß Fig. 3. Dieses Waferpyrometersignal beinhaltet einen Gleichanteil sowie einen Wechselanteil. Der Gleichanteil wird im Wesentlichen durch am Wafer reflektierte Strahlung gebildet, wie durch den Pfeil C in Fig. 2 dargestellt ist. Zusätzlich beinhaltet der Gleichanteil Waferstrahlung, d.h. Wärmestrahlung des Wafers und einen Gleichanteil der am Wafer und/oder an den Kammerwänden der Prozesskammer und/oder des Gehäuses reflektierten Lampenstrahlung.

Das vorhergesagte Waferpyrometersignal ist ein Signal, das aus einem Vorhersagewert der Waferstrahlung  $DC_{\text{Wafer-vorh.}}$  und einem Lampen-Vorhersagewert  $(AC+DC)_{\text{Lampenrefl.-vorh.}}$  gebildet wird. Dabei enthält der Vorhersagewert der Waferstrahlung im Wesentlichen nur einen Gleichanteil, während der Lampen-Vorhersagewert einen Gleich- und Wechselanteil beinhaltet.

Der Vorhersagewert der Waferstrahlung wird aus der im Block 40 ermittelten Wafertemperatur  $T_{\text{wafer}}$  bestimmt. Die ermittelte Wafertemperatur wird zunächst an einen Block 44 weitergeleitet. Im Block 44 wird eine vorhergesagte Intensität der Waferstrahlung im Pyrometermessbereich, beispielsweise bei  $2,3 \mu\text{m}$  bestimmt. Die Bestimmung erfolgt anhand der Wafertemperatur  $T_{\text{wafer}}$  und einer ermittelten Emissivität  $E_{\text{wafer-skal}}$  des Wafers. Die Ermittlung der Emissivität wird nachfolgend noch näher erläutert.

Die vorhergesagte Intensität der Waferstrahlung  $I_{\text{wafer-2,3}}$  wird anschließend an den Block 46 weitergeleitet. Im Block 46 wird der Anteil der Waferstrahlung im Pyrometersignal vorhergesagt, wobei der Anteil im Wesentlichen ein Gleichanteil ist, aber ggf. auch einen Wechselanteil beinhalten kann. Die Vorhersage erfolgt unter Verwendung eines Modells, in das die Intensität der Waferstrahlung im Pyrometermessbereich ( $I_{\text{wafer-2,3}}$ ) sowie die ermittelte Emissivität  $E_{\text{wafer-skal}}$  als variable Größen eingehen. Dabei enthält das Modell ferner ein Modell, das den Einfluss der Kammer auf die scheinbare Emissivität des Wafers berücksichtigt, d.h. eine scheinbare Emissivitätserhöhung durch die Reflektionseigenschaften der Prozesskammer bzw. der Kammerwände. Der vorhergesagte Anteil der Waferstrahlung im Pyrometersignal  $DC_{\text{wafer-vorh.}}$  stellt den Vorhersagewert der Waferstrahlung dar, und wird an einen Addierer im Block 48 weitergeleitet, in dem er mit dem Lampen-Vorhersagewert addiert wird, um das vorhergesagte Waferpyrometersignal  $(DC + AC)_{\text{Komplet-vorh.}}$  zu erhalten.

Der Lampen-Vorhersagewert wird separat zum Vorhersagewert der Waferstrahlung ermittelt. Dabei wird zunächst die Intensität der Lampenstrahlung anhand der an die Lampen angelegten effektiven Spannung oder einem anderen geeigneten Strahlungsquellenparameter mit einem Lampen- (Strahlungsquellen-)modell ermittelt, und zwar im Block 50. Die effektive, an die Lampen angelegte Spannung, wird beispielsweise aus der Steuereinheit im Block 34 gemäß Fig. 3 an den Block 50 geliefert. Zur Vereinfachung des Lampenmodells wird nicht die Intensität jeder einzelnen Lampe, von denen beispielsweise über fünfzig in der Schnellheizanlage vorgesehen sein können, bestimmt. Vielmehr sind vorzugsweise die Lampen in unterschiedliche Gruppen, beispielsweise vier Gruppen aufgeteilt, wobei die Lampen jeder Gruppe im Wesentlichen jeweils mit derselben Lampenspannung angesteuert werden. Bei dem bevorzugten Ausführungsbeispiel erfolgt die Bestimmung des Intensitätswerts für die jeweiligen Gruppen anhand wenigstens zweier Repräsentanten der Gruppe.

Das Lampenmodell ist so aufgebaut, dass es Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Lampenfilamenten berücksichtigt. Ferner berücksichtigt das Lampenmodell Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Lampen und der

Waferstrahlung. Daher wird bei der Bestimmung der Intensität der Lampenstrahlung neben der angelegten effektiven Spannung der Lampen auch eine vorhergesagte Breitbandintensität  $I_{\text{Wafer-vorh.}}$  der Waferstrahlung in das Lampenmodell eingegeben. Die vorhergesagte Breitbandintensität der  
5 Waferstrahlung wird im Block 52 bestimmt, und zwar anhand der im Block 40 ermittelten Wafertemperatur  $T_{\text{wafer}}$  und gegebenenfalls der ermittelten Emissivität.

Die Komponenten, die in das Lampenmodell eingehen, sind zur  
10 Verdeutlichung nochmals in Fig. 7 dargestellt. Dabei bildet der Kreis 54 das eigentliche Lampenmodell. Aus dem Lampenmodell wird die Lampenstrahlung abgeleitet, wie durch den Kreis 56 dargestellt ist.

In das Lampenmodell 54 geht ein idealisiertes Lampenmodell ein, das die  
15 Intensität der Lampenstrahlung in einem freien endlosen Raum modelliert. In das Lampenmodell 54 geht jedoch auch ein Korrekturparameter aus dem Block 60 ein, der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Lampenfilamenten der Lampen, insbesondere zwischen benachbarten Lampen berücksichtigt. Diese Wechselwirkungen sind schematisch in dem in  
20 der rechten unteren Ecke in Fig. 7 dargestellten Diagramm angedeutet.

In das Lampenmodell 54 geht auch noch ein zweiter Korrekturparameter aus dem Kreis 62 ein, der Wechselwirkungen zwischen dem Lampenfilament und dem Wafer 2 berücksichtigt. Diese Wechselwirkungen sind ebenfalls in der  
25 schematischen Darstellung angedeutet.

Die jeweiligen Wechselwirkungen zwischen den Lampenfilamenten untereinander und zwischen den Lampenfilamenten und dem Wafer werden vorab anhand eines Referenzsensors ermittelt, wie durch den Kreis 64  
30 dargestellt ist. Statt einer Messung mittels eines Referenzsensors ist es natürlich auch möglich, ein entsprechendes mathematisches Modell für die jeweiligen Wechselwirkungen vorzusehen.

Nun wird wieder auf die Fig. 4 Bezug genommen und die Bestimmung des  
35 Lampen-Vorhersagewerts weiter erläutert. Die im Block 50 bestimmte

Intensität der Lampenstrahlung  $I_{\text{lampen}}$  wird nun an den Block 66 weitergeleitet. Im Block 66 wird der vorhergesagte Anteil der Lampenstrahlung im Pyrometersignal bestimmt. Die Bestimmung erfolgt durch ein Modell, das die Intensität der Lampenstrahlung  $I_{\text{lampen}}$  und die bestimmte Emissivität  $E_{\text{wafer-skal.}}$  des Wafers als Eingangsgrößen verwendet. Das Modell beinhaltet eine Gewichtung für den Anteil der einzelnen Lampen, da die unterschiedlichen Lampen einen unterschiedlichen Einfluss auf das Pyrometersignal besitzen. Das Modell berücksichtigt den am Wafer reflektierten Anteil der Lampenstrahlung im Pyrometermessbereich, der in das Gesichtsfeld des Pyrometers fällt, wobei das Modell die Reflektivität des Wafers sowie die Kammergeometrie berücksichtigt. Die Reflektivität des Wafers wird wiederum aus der bestimmten Emissivität  $E_{\text{wafer-skal.}}$  ermittelt. Im Wesentlichen gilt, dass die Reflektivität des Wafers gleich eins minus der Emissivität ist, sofern der Wafer für die Lampenstrahlung undurchsichtig ist.

Der vorhergesagte Anteil der Lampenstrahlung im Pyrometersignal ( $AC + DC$ ) $_{\text{lampenreflektion-vorh.}}$  wird als Lampen-Vorhersagewert an den Addierer im Block 48 geliefert und dort mit dem Vorhersagewert der Waferstrahlung addiert. Der Lampen-Vorhersagewert beinhaltet einen Gleichanteil, sowie einen Wechselanteil, wobei der Wechselanteil aus einer Modulation der Lampenintensität z.B. durch Modulation der effektiven angelegten Spannung stammt.

Wie schon erwähnt, wird im Block 48 der Vorhersagewert der Waferstrahlung mit dem Lampen-Vorhersagewert addiert, um das vorhergesagte Waferpyrometersignal zu erzeugen, das in den Block 42 geliefert wird. Im Block 42 wird eine Differenz zwischen dem tatsächlich gemessenen Waferpyrometersignal und dem vorhergesagten Waferpyrometersignal ermittelt und daraus eine Zustandskorrektur (Regelgröße)  $Z$  bestimmt, die wiederum einen Einfluss auf die ermittelte Wafertemperatur  $T_{\text{wafer}}$  im Block 40 besitzt. Dabei ist das System so ausgelegt, dass die Differenz bei fortlaufendem Durchlauf der obigen Schleifen gegen Null konvergiert. Sobald die Differenz bei Null bzw. innerhalb eines vordefinierten Toleranzintervalls ist, ist davon auszugehen, dass die ermittelte Wafertemperatur  $T_{\text{wafer}}$  der tatsächlichen Wafertemperatur entspricht.

In einigen der oben genannten Funktionsblöcke wurde eine "ermittelte Emissivität" als Eingangsgröße verwendet. Wie die ermittelte Emissivität bestimmt werden kann, wird nachfolgend unter Bezugnahme auf Fig. 4 näher erläutert.

Wie schon weiter oben beschrieben, wird im Block 48 gemäß Fig. 4 ein Vorhersagewert der Waferstrahlung mit einem Lampen-Vorhersagewert addiert, um ein vorhergesagten Waferpyrometersignal  $(DC + AC)_{\text{kompl.-vorch.}}$  zu erhalten. Dieses vorhergesagte Waferpyrometersignal, das sowohl einen Wechsel- wie auch einen Gleichanteil besitzt, wird zu einem Filter im Block 90 geleitet, in dem der Gleichanteil herausgefiltert wird. Das aus dem Block 90 austretende Signal beinhaltet somit lediglich einen Wechselanteil, der im Wesentlichen ausschließlich von der Modulation der Lampenstrahlung stammt. Dieses Signal wird als  $AC_{\text{lampen-vorch.}}$  bezeichnet. Dieses Signal wird als Eingangsgröße in den Block 92 weitergeleitet. Als weitere Eingangsgröße wird ein gefilterter Anteil des gemessenen Waferpyrometersignals in den Block 92 geleitet. Hierzu wird das gemessene Waferpyrometersignal  $(DC + AC)_{\text{kompl.-gem.}}$  durch einen Filter im Block 94 geleitet, um den Gleichanteil herauszufiltern. Das resultierende Signal entspricht dem gemessenen Wechselanteil des Waferpyrometersignals  $AC_{\text{gem.}}$ , das ebenfalls als Eingangsgröße in den Block 92 geleitete wird. Aus dem gemessenen Wechselanteil des Waferpyrometersignals und dem vorhergesagten Wechselanteil des Waferpyrometersignals wird im Block 92 ein Emissivitätswert für den Wafer bestimmt. Hierzu passt zunächst ein adaptiver Algorithmus die optischen Eigenschaften des Systemmodells (einschließlich z.B. Emissivität, Reflektivität und Transmissivität des Wafers) so an, dass sich die Wechselanteile ( $> 1\text{Hz}$ ) des gemessenen Waferpyrometersignals und des vorhergesagten Waferpyrometersignals decken. Da dieser Adaptionsalgorithmus nur die Wechselanteile des gemessenen Waferpyrometersignals und des vorhergesagten Waferpyrometersignals verwendet und vergleicht, gelingt die Adaption unabhängig vom Zustand des realen Systems und dem Systemmodell, insbesondere unabhängig von der Temperatur des Wafers (Objekts). Nach der Adaption können die optischen

Eigenschaften und insbesondere die Emissivität aus dem Systemmodell entnommen bzw. abgegriffen werden.

5 Sofern der Wafer während der thermischen Behandlung gedreht d.h. rotiert wird, kann die Waferrotation einen der Rotationsgeschwindigkeit entsprechenden Wechselanteil erzeugen, der wiederum bei der Bestimmung des Emissivitätswerts im Block 92 berücksichtigt werden kann. Beispielsweise kann der der Rotationsgeschwindigkeit entsprechende Wechselanteil herausgefiltert werden.

10 Der im Block 92 ermittelte Emissivitätswert  $E_{\text{wafer}}$  wird nun an den Block 94 weitergeleitet, in dem er für nachfolgende Prozesse skaliert wird, und als  $E_{\text{wafer-skal.}}$  an nachfolgende Bestimmungsprozesse geliefert wird.

15 Bei der obigen Emissivitätsbestimmung wird im Wesentlichen nur die Emissivität im Messbereich des verwendeten Strahlungsdetektors, wie beispielsweise des Waferpyrometers 26, die beispielsweise bei  $2,3 \mu\text{m}$  liegt, ermittelt. Bei dieser Bestimmung wird davon ausgegangen, dass die Wechselanteile der Strahlungssignale der Messung sowie der Vorhersage, die  
20 primär aus der Modulation der Strahlungsquellen stammen, im Wesentlichen durch Reflexion am Wafer bzw. Reflexion an den Kammerwänden erzeugt werden. Daher ist die Reflektivität des Wafers ein wichtiger Faktor bei der oben beschriebenen Anpassung der optischen Eigenschaften durch den Adaptionsalgorithmus. Natürlich kann auch die Transmissivität des Wafers  
25 eine wichtige Rolle hierbei einnehmen, sofern der Wafer für die Heizstrahlung nicht opak ist.

Fig. 5 zeigt eine vereinfachte Darstellung eines Systems zur Bestimmung der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage, bzw. zur  
30 Bestimmung eines Zustands bzw. einer Zustandsvariablen. In Fig. 5 werden dieselben Bezugszeichen wie in den vorhergehenden Figuren verwendet, sofern ähnliche oder äquivalente Elemente beschrieben werden.

Figur 6 zeigt eine vereinfachte Darstellung zur Bestimmung der Emissivität  
35 bzw. zur Bestimmung von Modellparametern. Wie in Figur 4 beschrieben,

laufen bei den erfindungsgemäßen Verfahren die Bestimmung wenigstens einer Zustandsvariablen (z.B. der Wafertemperatur) und die Bestimmung bzw. Anpassung wenigstens eines Modellparameters (z.B. der Emissivität) parallel ab, wobei die Zustandsbestimmung mittels eines Beobachters erfolgt, der in  
5 Figur 5 vereinfacht durch die Funktionsblöcke 76, 72, 82, 84 und 86 dargestellt ist. Die Anpassung oder Adaption der Modellparameter erfolgt mittels eines adaptiven Beobachters, der in Figur 6 schematisch durch die Funktionsblöcke 104, 102, 112, 110 und 108 beschrieben wird.

10 Zur nochmaligen Verdeutlichung der in Figur 4 dargelegten Erfindung werden im folgenden die Zustandsbestimmung und die Parameteradaption mittels der in den Figuren 5 und 6 schematisch dargestellten Beobachtern nochmals getrennt voneinander beschrieben, wobei im erfindungsgemäßen Verfahren nach Fig. 4 wie erwähnt die Zustandsbestimmung und Parameteradaption  
15 parallel ablaufen. Ein sequentielles Ablaufen der Zustands- und Parameterbestimmung wäre ebenfalls möglich, indem z.B. nacheinander verschiedene Meßgrößen und deren Vorhersagewerte ermittelt werden, d.h. z.B. daß Wechsel- und Gleichanteile eines Meßsignals im Gegensatz zur Ausführungsform in Fig. 4 nacheinander ermittelt und zur Zustands- bzw.  
20 Parameterbestimmung verwendet werden.

In Fig. 5 ist schematisch eine Schnellheizanlage 1 mit Heizlampen 18 dargestellt. In der Schnellheizanlage 1 ist ein Halbleiterwafer 2 zu dessen thermischer Behandlung angeordnet. Ein Pyrometer 26 ist auf eine Seite des  
25 Wafers 2 gerichtet.

Die Heizlampen 18 werden über eine Ansteuereinheit 70 angesteuert.

30 Während der thermischen Behandlung des Wafers 2 wird von dem Wafer kommende Strahlung, die sowohl Waferstrahlung als auch am Wafer reflektierte Strahlung beinhaltet im Pyrometer 26 gemessen, und das Messsignal wird an den Block 72 weitergeleitet. Das Messsignal ist auch bei 74 schematisch dargestellt.



Neben der tatsächlichen Schnellheizanlage 1 ist in dem gestrichelten Kasten 76 ein Modell einer Schnellheizanlage 1' dargestellt. Die Merkmale der modellhaften Schnellheizanlage werden jeweils mit einem Apostroph ' gekennzeichnet. Das Modell der Schnellheizanlage 1' beinhaltet z.B. ein Modell der Lampen 18', ein Modell des Wafers 2', ein Modell der Kammer 4' sowie ein Modell des Pyrometers 26'. Das Ansteuersignal der Heizlampen 18 wird in das Modell der Schnellheizanlage 1 eingegeben, wie durch die gestrichelte Linie 78 dargestellt ist. Durch den Block 80, der ein Teil des Gesamtmodells ist, wird in dem Modell als Anlage 1' eine Temperatur T des Wafers 2' angegeben, die einen Einfluss auf die Zustände des Wafermodells bzw. der Zustände der anderen Modelle und/der das Modell des Wafer 2' bzw. die anderen Modelle besitzt. Anhand der Ansteuerleistung, und der vorgegebenen Temperatur T für den Wafer 2' berechnet das Modell der Schnellheizanlage 1' ein vorhergesagtes Pyrometersignal  $(DC + AC)_{\text{kompl.-vorh.}}$  und überträgt dieses an den Block 82. Das gemessene Pyrometersignal aus dem Block 72 und das vorhergesagte Pyrometersignal 82 werden beide in dem Block 84 übertragen, in dem eine Differenz zwischen diesen beiden Werten berechnet wird. Aus der Differenz wird dann eine Zustandskorrektur (Regelgröße) bestimmt, die in den Block 80 übertragen wird, um die dort bestimmte Temperaturgröße T (die sich als Zustandsvariable eines Zustands des oder der Modelle ergibt) des Wafers 2' im Modell unter Berücksichtigung der Zustandskorrektur zu verändern. Die Temperatur T wird auch aus dem Modell zu dem Kreis 86 ausgegeben und kann außerhalb des Modells beispielsweise für eine Temperaturregelung oder Temperaturstuerung verwendet werden. Das in Fig. 5 gezeigte System vergleicht kontinuierlich oder in vorgebbaren zeitlichem Ablauf (z.B. mittels einer Tastfrequenz) das gemessene Pyrometersignal und das aus dem Modell vorhergesagte Pyrometersignal und versucht durch Auswahl geeigneter Zustände der Modelle die Differenz gegen Null zu regeln. Wenn die Differenz Null oder innerhalb eines Toleranzbereichs ist, entspricht die modellierte Wafertemperatur T im Kreis 86 der tatsächlichen Wafertemperatur, die sich somit genau unter Verwendung eines einzelnen Waferpyrometers 26 ermitteln lässt.

Der bei 74 gezeigten tatsächlichen Strahlungsintensität steht bei 88 die modellierte Strahlungsintensität gegenüber, die gemäß dem Modell in eine Waferstrahlung und eine Lampenstrahlung unterteilt werden kann, da die jeweiligen Beiträge aus den Modellvorhersagen identifizierbar sind.

5

Fig. 6 zeigt eine alternative Darstellung eines Systems zur Bestimmung der Emissivität gemäß der vorliegenden Erfindung, wobei die Darstellung in ihrem Aufbau der Darstellung gemäß Fig. 5 ähnelt. Daher werden in Fig. 6 dieselben Bezugszeichen verwendet wie in Fig. 5, sofern dieselben oder äquivalente Teile beschrieben werden. Fig. 6 zeigt wiederum eine schematische Darstellung einer Schnellheizanlage 1 mit einem Gehäuse 4, sowie Strahlungsquellen 18 und einem darin aufgenommenen Halbleiterwafer 2. Ferner ist wiederum ein Pyrometer 26 gezeigt. Die Heizlampen 18 werden wiederum über eine Ansteuereinheit 70 angesteuert.

15

Bei 100 ist die tatsächlich gemessene Strahlungsintensität des Pyrometers 26 dargestellt, wobei in Fig. 6 nur der Wechselanteil dargestellt ist. Dieser Wechselanteil  $AC_{\text{gem.}}$  wird von dem Pyrometer 26 auch an einen Block 102 weitergeleitet.

20

In einem Block 104 ist wiederum ein Modell der Schnellheizanlage dargestellt, wobei die Modellelemente mit einem Apostroph ' versehen sind. Das Modell der Schnellheizanlage 1' umfasst ein Modell des Wafers 2', der Kammer 4', der Heizlampen 18' sowie des Pyrometers 26'.

25

In dieses Modell wird die Ansteuerleistung der Ansteuereinheit 70 eingespeist, wie durch die gestrichelte Linie 78 angezeigt ist. In dem Kasten 104 ist ferner ein Block 106 angegeben, in dem eine Emissivität des Wafers bei  $2,3 \mu\text{m}$  festgelegt wird, die in das Modell des Wafers 2' eingeht, und zu dem Oval (Schnittstelle) 108 ausgegeben wird. Innerhalb des Modells wird nunmehr anhand der an die Schnellheizanlage 1 angelegten Ansteuerleistung ein Wechselanteil des Pyrometersignal vorhergesagt  $AC_{\text{vorh.}}$ . Dieses Signal wird an den Block 110 übertragen, und von dort an den Block 112. Das Signal  $AC_{\text{gem.}}$  aus dem Block 102 wird ebenfalls in den Block 112 übertragen. In dem Block 112 wird eine Differenz zwischen dem tatsächlich gemessenen

35

Wechselanteil des Pyrometersignals und dem vorhergesagten Wechselanteil des Pyrometersignals bestimmt und aus dieser Differenz wird ein Regelparameter ermittelt, der an den Block 106 geliefert wird. Anhand des Regelparameters wird im Block 106 die Emissivität als Zustandsvariable des Wafers (bzw. genauer als Parameter des Systemmodells) geändert und sowohl in das Modell des Wafers 2' eingespeist als auch zu dem Oval (einer Schnittstelle) 108 ausgegeben. Es sei bemerkt, dass eine Änderung der Emissivität natürlich auch eine Änderung anderer optischer Eigenschaften, wie der Reflektivität und/oder der Transmissivität in dem Modell nach sich zieht, obwohl hierauf nicht im einzelnen eingegangen wird.

Das System ist wiederum so aufgebaut, dass es versucht, die Differenz AC auf Null bzw. auf einen Wert innerhalb eines vordefinierten Toleranzintervalls zu reduzieren, so dass die modellierte Emissivität mit der tatsächlichen Emissivität des Wafers übereinstimmt.

Die unterschiedlichen zuvor verwendeten Modelle können in unterschiedlicher Weise aufgebaut werden. Bei dem Lampenmodell kann eine Kalibrierung des Lampenmodells, und insbesondere die Auswirkung jeder einzelnen Lampe auf das Modell, sowie die Gewichtung jeder Lampe hinsichtlich des vorhergesagten Pyrometersignal anhand eines Kalibrationsverfahrens ermittelt werden. Bei einem derartigen Kalibrationsverfahren können jeweils einzelne Lampen betrieben und die davon ausgehende Lampenstrahlung gemessen werden. Dies kann mit und ohne Wafer in der Schnellheizanlage erfolgen. Mit Wafer in der Schnellheizanlage wird der Gewichtungsfaktor für das vorhergesagte Pyrometersignal der Lampen ermittelt, während ohne Wafer die reine Strahlungsintensität der Lampe bei einer bestimmten Ansteuerleistung ermittelt wird.

Zusammenfassend lässt sich hinsichtlich eines Aspekts der Erfindung ausführen, dass es möglich ist, ein Modell zu entwickeln, das die Prozeßparameter in einer RTP-Kammer dynamisch gut beschreibt. Dabei kann eine wesentliche Unsicherheit des Modells in den optischen Parametern eines in der Kammer befindlichen Wafers liegen. Unter der Nutzung von Wechselanteilen der von moduliert angesteuerten Heizstrahlern erzeugten

Heizstrahlung können die optischen Parameter des Modells an die des realen Systems in der oben genannten Art angepasst werden. Da diese Anpassung nur die Wechselanteile der Strahlung in der Kammer berücksichtigt, ist sie im Wesentlichen unabhängig vom Zustand (z.B. der Temperatur) des Wafers.

5 Nach der Anpassung ist die Unsicherheit des Modells hinsichtlich der optischen Parameter des Wafers beseitigt und das Modell sowie das reale System besitzen ein nahezu gleiches Übertragungsverhalten (Ansteuergröße der Heizstrahler zu gemessenem Pyrometersignal bzw. vorhergesagtem Pyrometersignal). Der Anfangszustand des realen Systems, insbesondere die  
10 Wafertemperatur, stimmt jedoch nicht notwendigerweise mit dem Anfangszustand des Systemmodells überein. Dieser Unterschied schlägt sich in einer Differenz zwischen dem gemessenen Pyrometersignal und dem vorhergesagten Pyrometersignal nieder, und zwar vorzeichengleich und für kleine Differenzen Proportional. Daher kann über diese Differenz eine  
15 Zustandskorrektur durchgeführt werden. Im Endeffekt sind somit die Modellparameter an die Parameter des realen Systems angeglichen und darüber hinaus folgt der Zustand des Modells auch dem des realen Systems in engen Grenzen. Daher kann eine Zustandsvariable, wie beispielsweise die Wafertemperatur direkt aus dem Modell entnommen bzw. daran abgegriffen  
20 werden.

Darüber hinaus kann in dem zuvor beschriebenen System ein Verfahren integriert werden, bei dem Unregelmäßigkeiten auf einer Seite des Halbleiterwafers, wie beispielsweise Flecken, auf die das Pyrometer gerichtet  
25 ist, vor dem Beladen des Wafers in die Schnellheizanlage 1 erkannt werden. Dies kann durch Scannen der besagten Oberfläche erfolgen und ein Kartografieren der Unregelmäßigkeiten. Beispielsweise können die einzelnen Schichten eines Stapels durch eine Mehrpunktmessung ermittelt werden. Diese Werte werden in das Temperaturberechnungsmodell eingegeben, so  
30 dass die Unregelmäßigkeiten bekannt sind und dementsprechend kompensiert werden können.

Somit lässt sich die Emissivität des Wafers bei jeder individuellen Temperatur berechnen und steht einer entsprechenden Steuereinheit bzw. dem Modell zur  
35 Verfügung.

Die Messung und Kartografierung der Rückseite kann bei Raumtemperatur durch ein Spektralelypsometer in Echtzeit durchgeführt werden, während der Wafer auf seine thermische Behandlung wartet. Eine weitere Möglichkeit wäre  
5 eine Oberflächenreflexionsmessung und eine Kartografierung der Oberseite bzw. der Oberfläche, die ebenfalls bei Raumtemperatur erfolgen könnte.

Dieses Verfahren, das Informationen für das Temperaturberechnungsmodell liefern kann, kann alternativ auch in einem herkömmlichen System zur  
10 Temperaturbestimmung eines Wafers eingesetzt werden.

Obwohl die Erfindung zuvor anhand eines bevorzugten Ausführungsbeispiels beschrieben wurde sei bemerkt, dass die Erfindung nicht auf die konkret dargestellten Ausführungsformen beschränkt ist und insbesondere auch  
15 Ausführungsformen umfaßt, die sich durch Kombination und/oder Austausch von Merkmalen einzelner Ausführungsformen ergeben.

**Patentansprüche**

1. Verfahren zur Bestimmung wenigstens einer Zustandsvariablen aus  
einem Modell eines RTP-Systems mittels wenigstens eines am RTP-  
System abgegriffenen Meßsignals, der Meßgröße, welche eine  
Abhängigkeit von der zu bestimmenden Zustandsvariablen aufweist,  
und  
  
eines mittels des Modells vorhergesagten Meßgröße, dem  
Vorhersagewert, wobei die Meßgröße und der Vorhersagewert jeweils  
Komponenten eines Gleich- und Wechselanteils umfassen, und  
  
wobei jeweils wenigstens der Wechselanteil durch Filter getrennt  
ermittelt wird, um eine erste Differenz zwischen dem Wechselanteil der  
Meßgröße und dem durch das Modell vorhergesagten Wechselanteil  
der Meßgröße zu bilden,  
  
Parameteradaption von wenigstens einem Modellparameter durch  
Rückführung der ersten Differenz in das Modell mit dem Ziel, das  
Modellverhalten auf variable Systemparameter anzupassen ,  
  
bilden einer zweiten Differenz aus Meßgröße und Vorhersagewert oder  
aus um den Wechselanteil bereinigter Meßgröße und bereinigtem  
Vorhersagewert,  
  
Zustandskorrektur eines Zustandes des Modellsystems durch  
Rückführung der zweiten Differenz in das Modell mit dem Ziel den  
Zustand des Modellsystems mit dem des realen Systems in  
Übereinstimmung zu bringen, und  
  
Abgreifen der wenigstens einen Zustandsvariablen am Modell.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die  
Rückführung der ersten Differenz über eine erste Bewertungsfunktion  
und einen ersten Regelalgorithmus und/oder die Rückführung der

zweiten Differenz über eine zweite Bewertungsfunktion und einen zweiten Regelalgorithmus erfolgt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das  
5 RTP-System eine Schnellheizanlage ist, mit der ein Objekt z.B. ein Halbleiterwafer mit Strahlungsquellen (Heizstrahler) erhitzt wird, und/oder das Modell wenigstens ein im RTP-System erhitztes Objekt, beispielsweise wenigstens einen Halbleiterwafer umfaßt und ein Systemmodell bildet.

10 4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß zur Modulation von Strahlungsquellen mittels einer Ansteuergrösse unterschiedliche Heizstrahler (Strahlungsquellen) mit unterschiedlichen Modulationsparametern angesteuert werden, um mehrere  
15 Modellparameter auf eindeutige Weise zu adaptieren, wie z.B. Transmissivität und/oder Reflektivität des Halbleiterwafers.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die  
20 Modulation durch eine kontinuierliche nicht notwendigerweise periodische Anregung erzeugt bzw. dargestellt wird, wie z.B. durch pseudo random Sequenzen, farbiges Rauschen oder auch durch parasitär im System durch Störungen verursachte Anregungen der Stellgröße der Heizstrahler.

25 6. Verfahren zum Bestimmen der Temperatur eines Halbleiterwafers in einer Schnellheizanlage, bei der das Substrat mit Strahlungsquellen (Heizstrahler) erhitzt wird, wobei das Verfahren die folgenden Schritte aufweist:

-Erfassen einer Ansteuergröße der Strahlungsquellen;

30 -Erfassen einer Messgröße wenigstens eines Objekts in der Schnellheizanlage, wobei die Messgröße eine hinreichende Abhängigkeit von der zu bestimmenden Temperatur des Halbleiterwafers besitzt;

35 -Bestimmen eines Vorhersagewerts der Messgröße des wenigstens einen Objekts über ein Systemmodell der Schnellheizanlage

einschließlich Halbleiterwafer, das mit der Ansteuergröße der Strahlungsquellen beaufschlagt wird;

-Bestimmen einer Zustandskorrektur oder Regelgröße aus einer Differenz zwischen der erfassten Messgröße und dem Vorhersagewert der Messgröße; und

-Bestimmen wenigstens einer Zustandsvariable eines Zustands des Halbleiterwafers anhand des Systemmodells mit Zustandskorrektur, wobei das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße wenigstens teilweise anhand der bestimmten Zustandsvariable erfolgt.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Zustandsvariable wenigstens die Temperatur des Halbleiterwafers umfasst.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass das Systemmodell durch Modellparameter optischen Eigenschaften des Wafers berücksichtigt, und die optischen Eigenschaften des Wafers in dem Systemmodell an die realen optischen Eigenschaften des Wafers in der Schnellheizanlage angeglichen werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Messgröße einen wesentlich von den optischen Eigenschaften des Wafers abhängenden Wechselanteil besitzt, der durch eine Modulation der Strahlungsquellen erzeugt wird, und die Angleichung der optischen Eigenschaften durch einen Algorithmus erfolgt, der den Wechselanteil in der erfassten Messgröße und den der vorhergesagten Messgröße durch Adaption der optischen Eigenschaften des Wafers im Systemmodell angleicht.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die optischen Eigenschaften des Wafers die



Emissivität und/oder die Reflektivität und/oder die Transmissivität umfassen.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 3 bis 10,  
5 dadurch gekennzeichnet, dass die Messgröße wenigstens vom Halbleiterwafer kommende Strahlung umfasst, die durch einen Pyrometer erfasst wird.
12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die  
10 erfasste Strahlung wenigstens Wärmestrahlung des Halbleiterwafers sowie am Halbleiterwafer reflektierte Strahlung der Strahlungsquellen umfasst.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 12, dadurch  
15 gekennzeichnet, dass das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße das Bestimmen eines Vorhersagewerts der Waferstrahlung umfasst, der einen durch den Halbleiterwafer bewirkten Anteil am Pyrometersignal vorhersagt.
- 20 14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass das Bestimmen des Vorhersagewerts der Waferstrahlung das Bestimmen eines Intensitätswerts der Wärmestrahlung des Halbleiterwafers im Bereich einer Meßwellenlänge des Pyrometers anhand der ermittelten Zustandsvariable und einer ermittelten Emissivität des Halbleiterwafers  
25 umfasst.
15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass das  
Bestimmen des Vorhersagewerts der Waferstrahlung anhand eines  
30 Modells unter Berücksichtigung des Intensitätswerts der Waferstrahlung im Bereich der Meßwellenlänge des Pyrometers und einer ermittelten Emissivität des Halbleiterwafers erfolgt.
16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass das Modell  
35 einen Einfluss der Kammer auf die ermittelte Emissivität des Halbleiterwafers berücksichtigt.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass das Bestimmen des Vorhersagewerts der Messgröße das Bestimmen eines Lampen-Vorhersagewerts umfasst, der einen durch die Strahlungsquellen bewirkten Anteil an einem Pyrometersignal vorhersagt.
18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass das Bestimmen des Lampen-Vorhersagewerts das Bestimmen eines Breitband-Intensitätswerts der Wärmestrahlung des Halbleiterwafers anhand der ermittelten Zustandsvariable und einer ermittelten Emissivität des Halbleiterwafers umfasst.
19. Verfahren nach Anspruch 16 oder 18, dadurch gekennzeichnet, dass das Bestimmen des Lampen-Vorhersagewerts das Bestimmen eines Intensitätswerts für die Strahlungsquellen anhand eines Lampenmodells und der Ansteuergröße der Strahlungsquellen umfasst.
20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass das Lampenmodell Wechselwirkungen zwischen dem Halbleiterwafer und den einzelnen Strahlungsquellen berücksichtigt.
21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass das Lampenmodell den vorhergesagten Breitband-Intensitätswerts der Wärmestrahlung des Halbleiterwafers als Eingangsgröße verwendet.
22. Verfahren nach einem der Ansprüche 19 bis 21, dadurch gekennzeichnet, dass das Lampenmodell Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Strahlungsquellen berücksichtigt.
23. Verfahren nach einem der Ansprüche 19 bis 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlungsquellen als Gruppen zusammengefasst sind und das Bestimmen des Intensitätswerts für die Strahlungsquellen für die jeweiligen Gruppen erfolgt.

24. Verfahren nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Bestimmung des Intensitätswerts für die Strahlungsquellen für die jeweiligen Gruppen anhand wenigstens zweier Repräsentanten der Gruppe erfolgt.

5

25. Verfahren nach Anspruch 23 oder 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlungsquellen wenigstens innerhalb einer Gruppe mit derselben Ansteuergröße angesteuert werden.

10

26. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass beim Bestimmen des Lampen-Vorhersagewerts ein Modell verwendet wird, das den am Halbleiterwafer reflektierten Anteil der Lampenstrahlung, der in das Gesichtsfeld des Pyrometers fällt, vorhergesagt, und zwar anhand des bestimmten Intensitätswerts der Strahlungsquellen und einer ermittelten Emissivität des Halbleiterwafers.

15

27. Verfahren nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass das Modell die Reflektivität des Halbleiterwafers ermittelt.

20

28. Verfahren nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass die Reflektivität anhand der ermittelten Emissivität ermittelt wird.

25

29. Verfahren nach einem der Ansprüche 26 bis 28, dadurch gekennzeichnet, dass das Modell die Kammergeometrie der Schnellheizanlage berücksichtigt.

30

30. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 29, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorhersagewert der Messgröße durch addieren des Vorhersagewerts der Waferstrahlung und des Lampen-Vorhersagewerts gebildet wird.

35

31. Verfahren nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorhersagewert der Waferstrahlung im Wesentlichen einen Gleichanteil des Vorhersagewerts der Messgröße beinhaltet und der Lampen-Vor-

herschagewert im Wesentlichen einen Gleichanteil sowie einen Wechselanteil des Vorherschagewerts der MessgröÙe beinhaltet.

32. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 31, dadurch  
5 gekennzeichnet, dass die Emissivität des Halbleiterwafers wenigstens teilweise aus dem Vorherschagewert der MessgröÙe ermittelt wird.
33. Verfahren nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, dass der  
10 Vorherschagewert der MessgröÙe gefiltert wird, um dessen Wechselanteil zu ermitteln, der im Wesentlichen dem modulierten Anteil der von den Strahlungsquellen stammenden und am Halbleiterwafer reflektierten Strahlung entspricht, der von einem Messfleck auf dem Halbleiterwafer in das Pyrometer fällt.
- 15 34. Verfahren nach Anspruch 33, dadurch gekennzeichnet, dass die Emissivität des Halbleiterwafers unter Verwendung eines adaptiven Algorithmus ermittelt wird, der den Wechselanteil des Vorherschagewerts der MessgröÙe und einen vom Pyrometer erfassten Wechselanteil, der von der Strahlung wenigstens eines Messflecks auf dem Halbleiterwafer  
20 herrührt, miteinander vergleicht..
35. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 34, dadurch  
25 gekennzeichnet, dass der Halbleiterwafer in der Schnellheizanlage rotiert wird, und die Rotationsgeschwindigkeit und/oder Phase im Modell zum Ermitteln der Emissivität und/oder optischen Fluktuationen des Substrates und/oder eines Waferträgers des Halbleiterwafers berücksichtigt wird.
- 30 36. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 35, dadurch gekennzeichnet, dass die ermittelte Emissivität skaliert wird, bevor sie anderen Prozessen zugeführt wird.
37. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 3 bis 36, dadurch gekennzeichnet, dass der Halbleiterwafer in dem Modell zum

Ermitteln der Zustandsvariable als Black Body angesehen wird.

38. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das RTP-System wenigstens eine Heizvorrichtung umfaßt, welche bezüglich ihrer abgegebenen Wärmeenergie moduliert ist und wobei die Meßgröße an einem Objekt ermittelt wird, welches aufgrund seiner thermischen Eigenschaften und/oder seiner thermischen Kopplung an die modulierte Heizvorrichtung bezüglich seiner Temperatur der Modulation der Heizvorrichtung nur unwesentlich folgt.

39. Verfahren nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß das Objekt ein Halbleiterwafer, eine wenigstens einen Halbleiterwafer wenigstens teilweise umgebende Umhüllung, eine Kammerwand einer Prozeßkammer des RTP-Systems oder ein Gegenstand in der Nähe eines Halbleiterwafers ist.

40. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6 oder 38, 39, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßgröße mittels eines Pyrometers und/oder eines Thermoelements ermittelt wird.

41. Verfahren nach einem der Ansprüche 38 bis 40, dadurch gekennzeichnet, daß die Zustandsvariable des Zustands die Temperatur des Objekts ist.

42. Verfahren nach einem der Ansprüche 38 bis 41, dadurch gekennzeichnet, daß die Zustandsvariable des Zustands die Temperatur des Halbleiterwafers ist, wobei die Meßgröße am Halbleiterwafer und/oder an einem Gegenstand in der Nähe des Halbleiterwafers ermittelt wird.

43. Verfahren nach einem der Ansprüche 38 bis 42, dadurch gekennzeichnet, daß die Modellparameter die optischen Eigenschaften des Objekts wie Reflektivität, Transmittivität und/oder Emissivität umfassen.

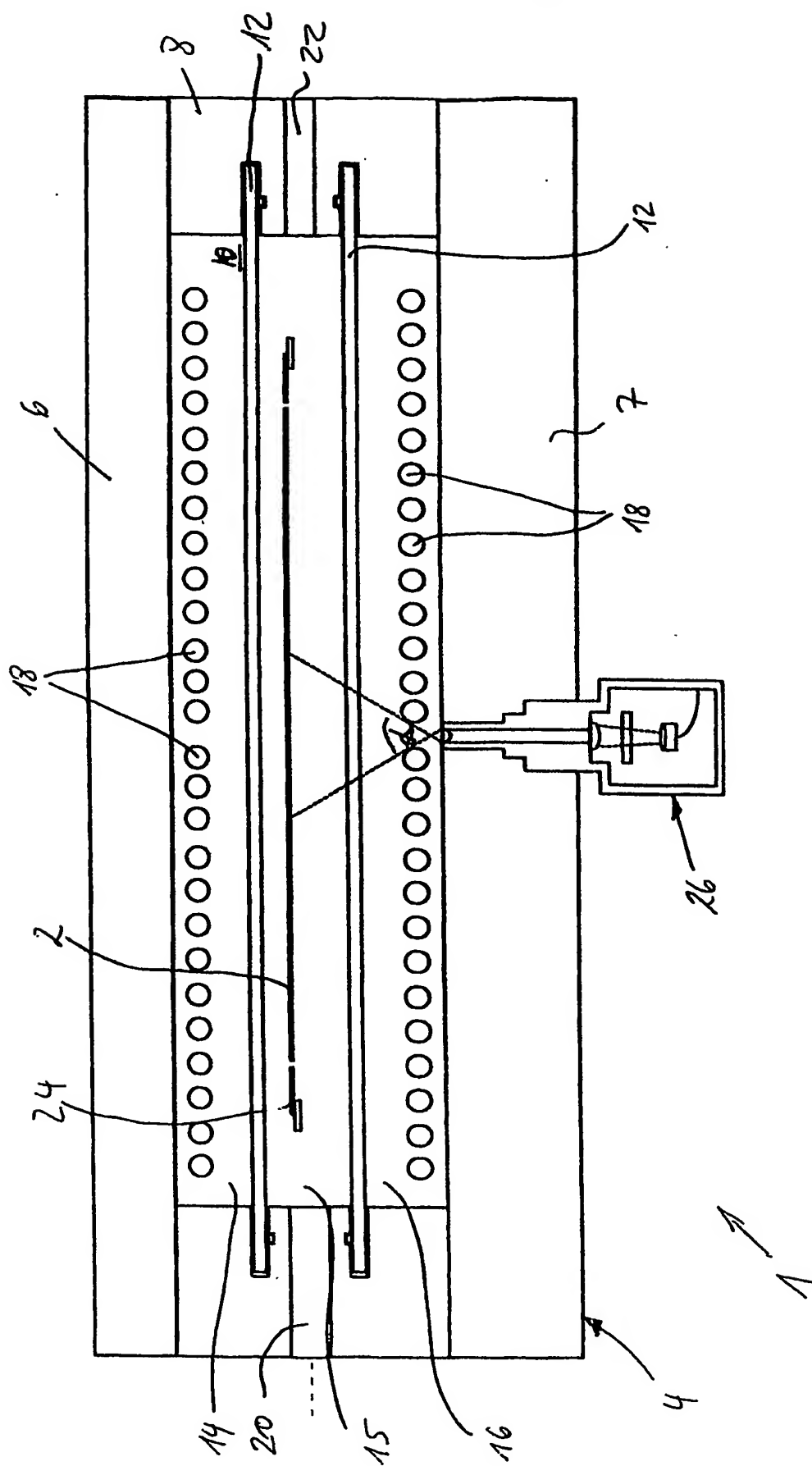


Fig 1

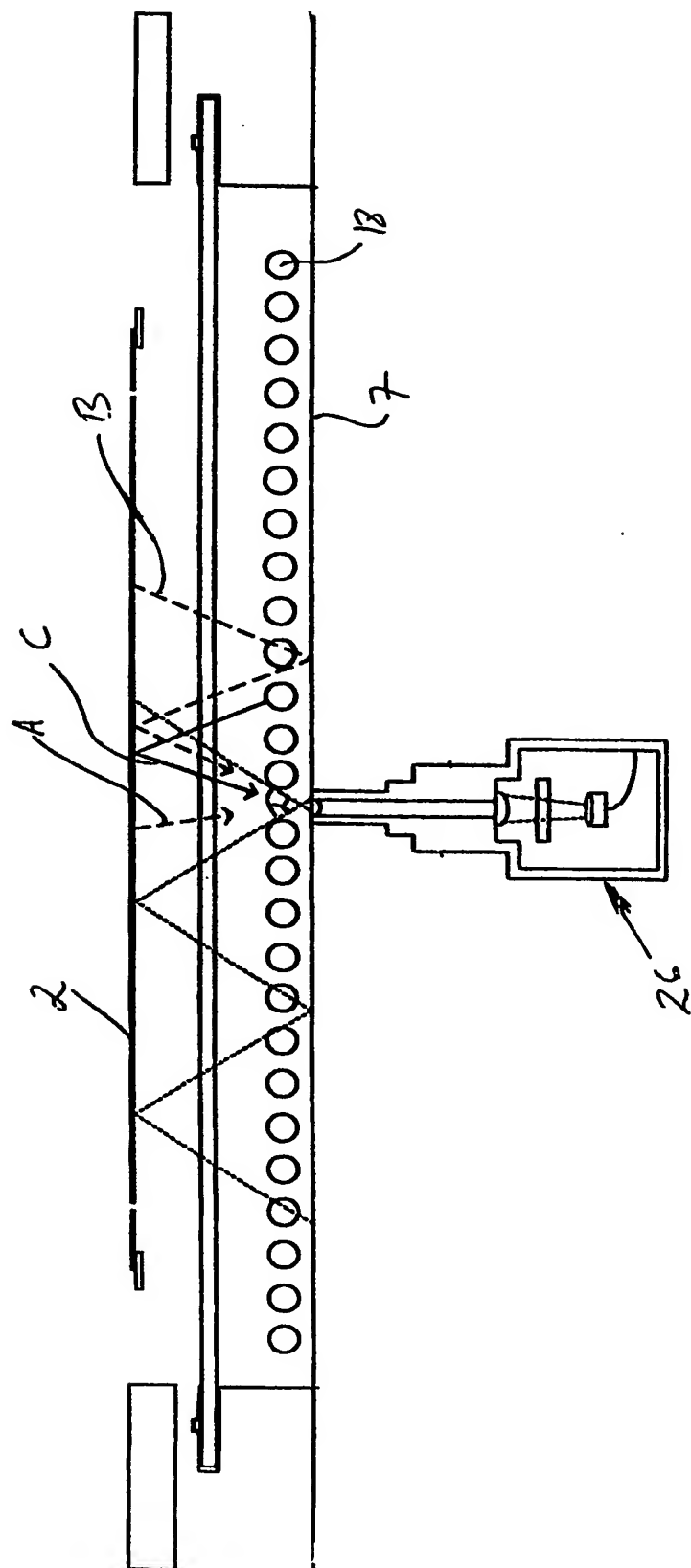


Fig. 2

Fig. 3

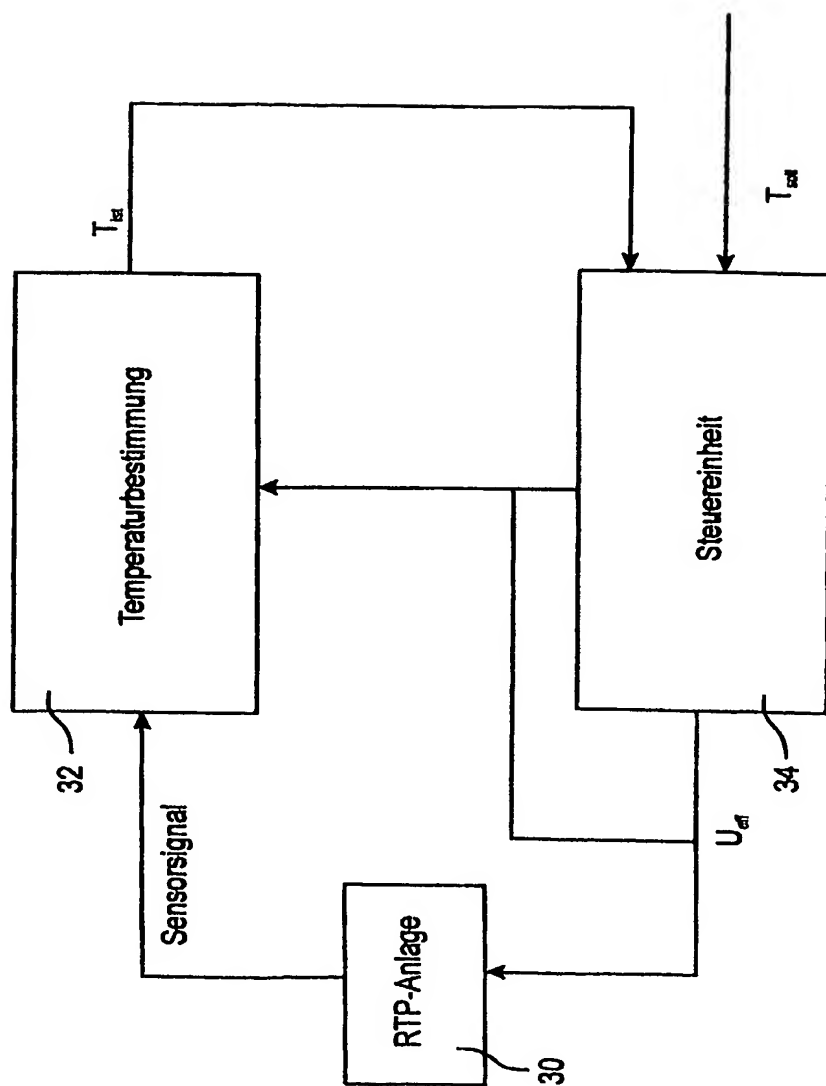
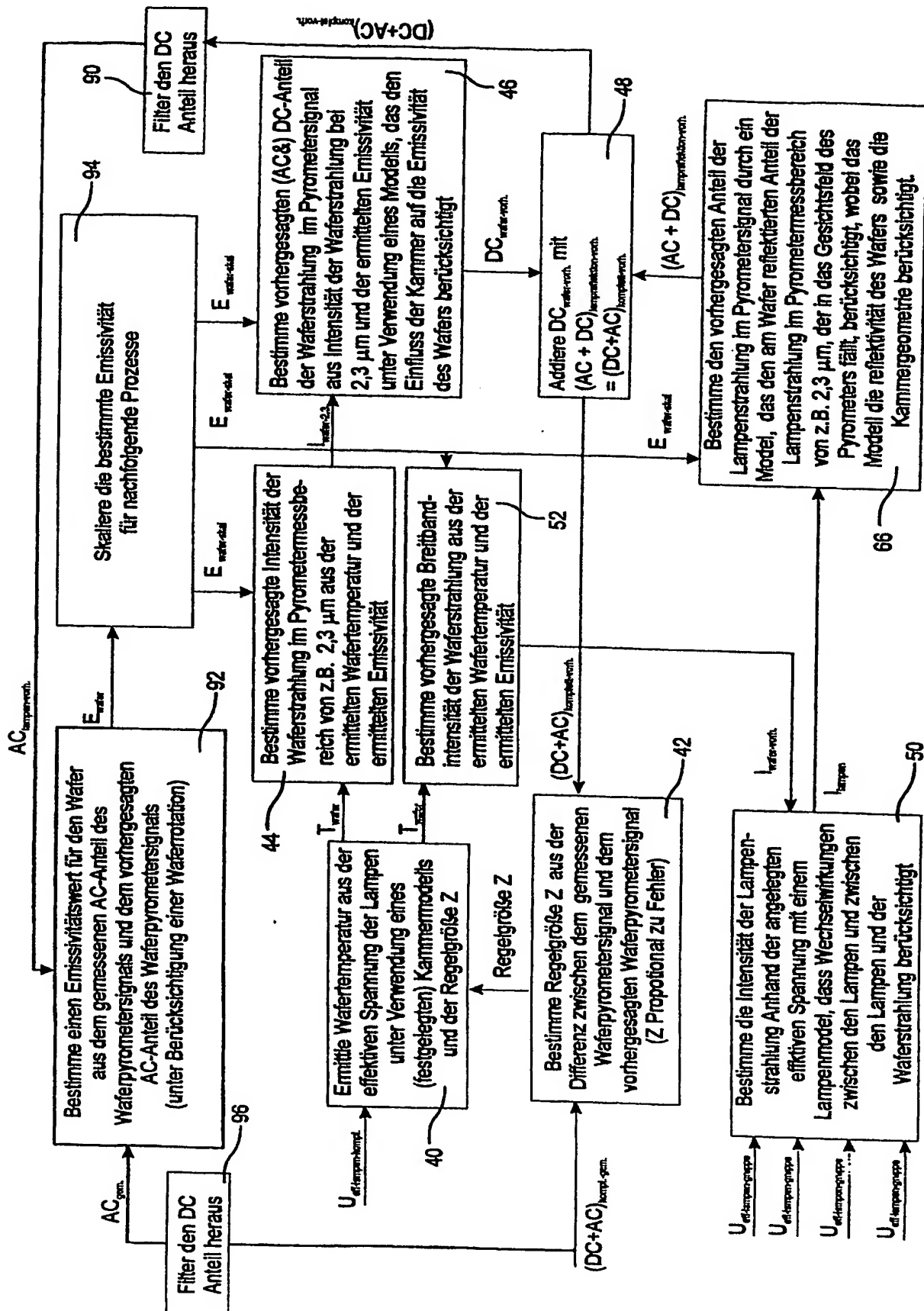




Fig. 4



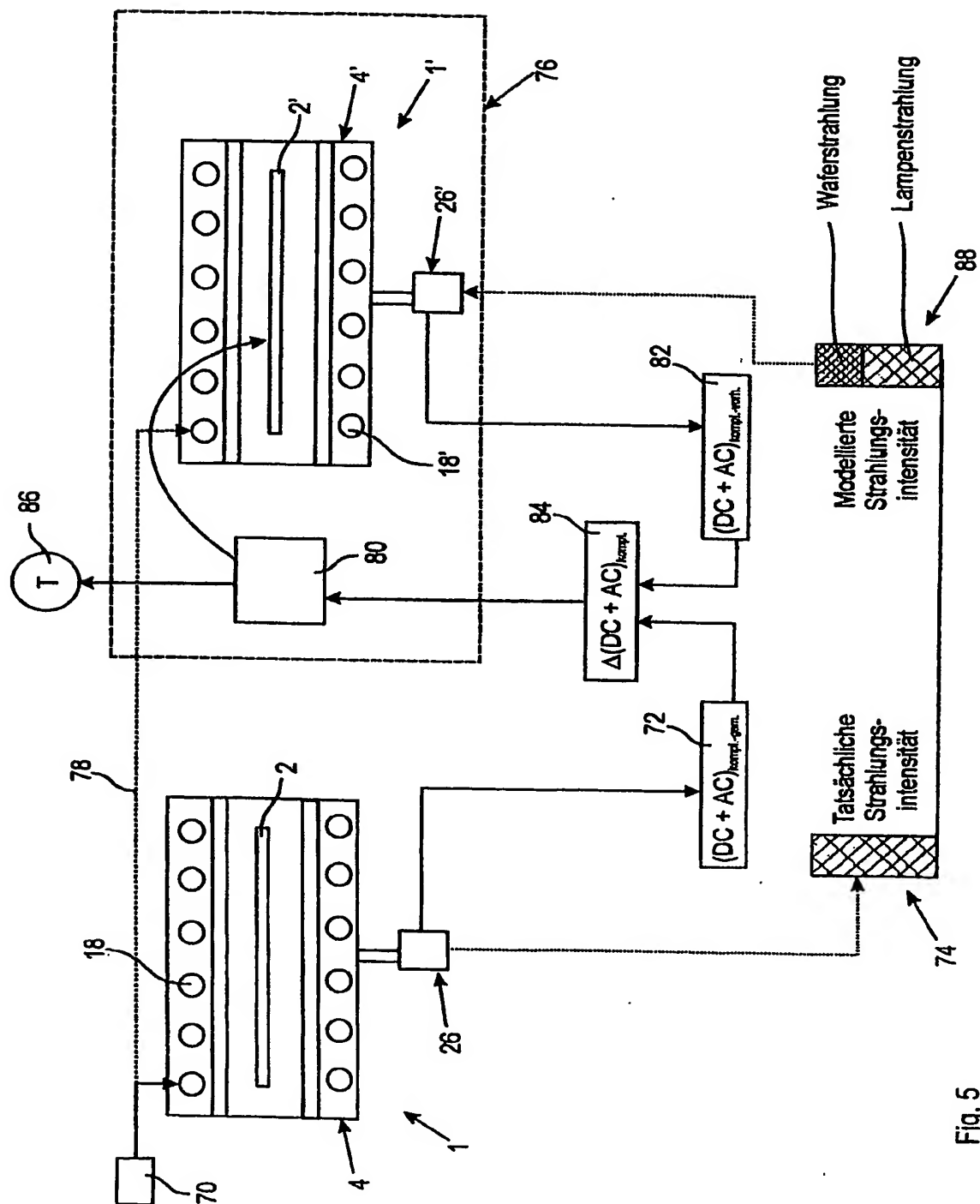
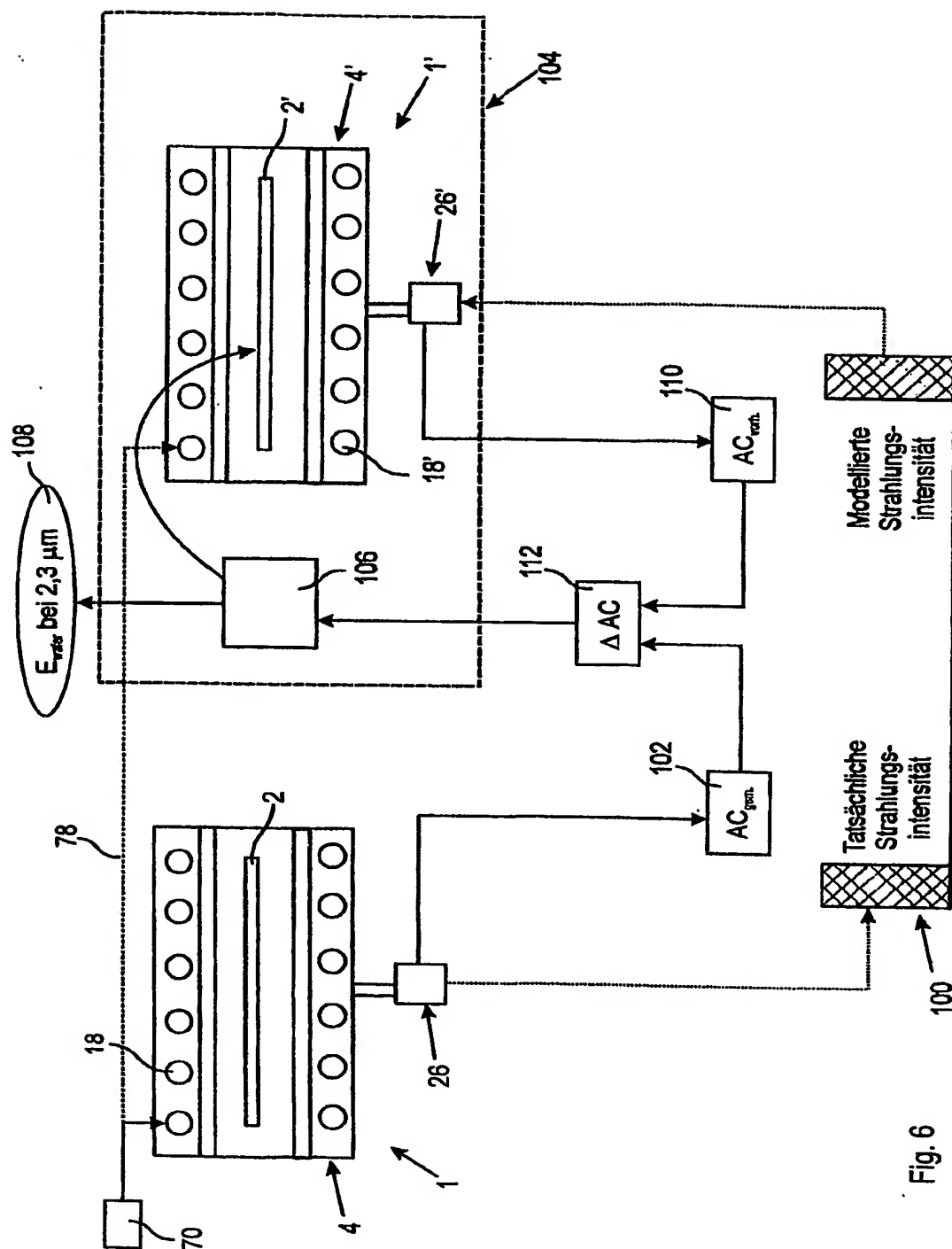


Fig. 5



**Fig. 6**

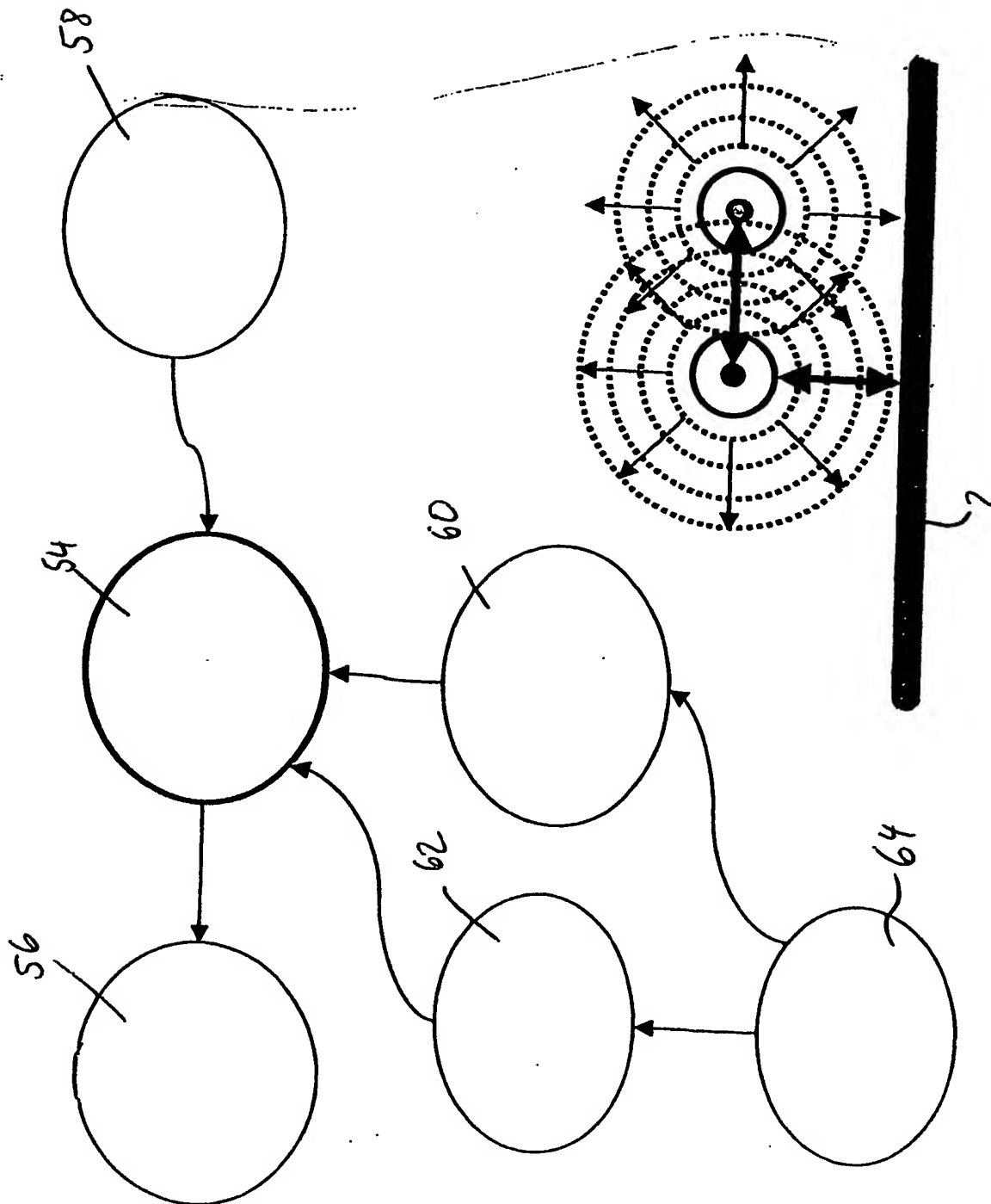
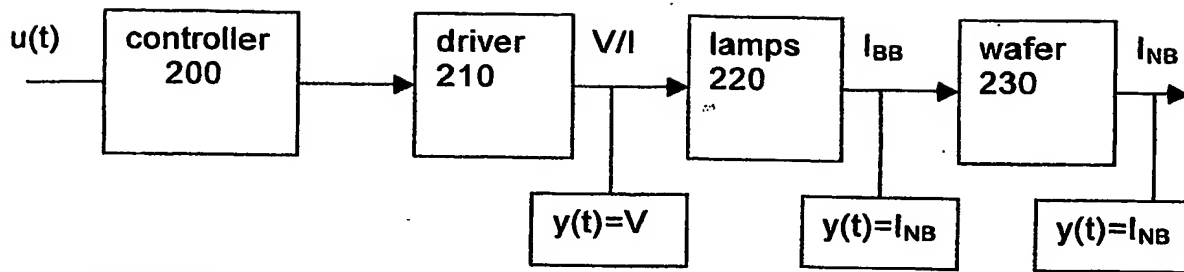


Fig. 7

**Figur 8**

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

PCT/EP 03/13387

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G01J5/00 H01L21/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01J H01L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2002/107604 A1 (CAMPBELL WILLIAM JARRETT ET AL) 8 August 2002 (2002-08-08) claim 1	1,6
A	US 5 442 727 A (FIORY ANTHONY T) 15 August 1995 (1995-08-15) column 6, line 58 - column 9, line 16	1,6
A	US 6 191 392 B1 (HAUF MARKUS ET AL) 20 February 2001 (2001-02-20) cited in the application abstract	1

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

### \* Special categories of cited documents :

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*G\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

17 March 2004

Date of mailing of the international search report

23/03/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

De Buyzer, H

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

PCT/EP 03/13387

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)		Publication date
US 2002107604	A1	08-08-2002	WO	02067297 A2	29-08-2002
US 5442727	A	15-08-1995	US	5305416 A	19-04-1994
			US	5624590 A	29-04-1997
			DE	69419801 D1	09-09-1999
			DE	69419801 T2	03-08-2000
			EP	0618430 A1	05-10-1994
			JP	2912157 B2	28-06-1999
			JP	6323915 A	25-11-1994
US 6191392	B1	20-02-2001	DE	19855683 A1	17-06-1999
			EP	0924500 A2	23-06-1999
			JP	3403099 B2	06-05-2003
			JP	11237281 A	31-08-1999
			SG	71178 A1	20-08-2003
			TW	401510 B	11-08-2000
			US	2001010308 A1	02-08-2001

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

PCT/EP 03/13387

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
IPK 7 G01J5/00 H01L21/00

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
IPK 7 G01J H01L

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 2002/107604 A1 (CAMPBELL WILLIAM JARRETT ET AL) 8. August 2002 (2002-08-08) Anspruch 1	1,6
A	US 5 442 727 A (FIORY ANTHONY T) 15. August 1995 (1995-08-15) Spalte 6, Zeile 58 - Spalte 9, Zeile 16	1,6
A	US 6 191 392 B1 (HAUF MARKUS ET AL) 20. Februar 2001 (2001-02-20) in der Anmeldung erwähnt Zusammenfassung	1

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

\*A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

\*E\* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

\*L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

\*O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

\*P\* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

\*T\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

\*X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

\*Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

\*Z\* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

17. März 2004

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

23/03/2004

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

De Buyzer, H



# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

PCT/EP 03/13387

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2002107604 A1	08-08-2002	WO 02067297 A2	29-08-2002
US 5442727 A	15-08-1995	US 5305416 A	19-04-1994
		US 5624590 A	29-04-1997
		DE 69419801 D1	09-09-1999
		DE 69419801 T2	03-08-2000
		EP 0618430 A1	05-10-1994
		JP 2912157 B2	28-06-1999
		JP 6323915 A	25-11-1994
US 6191392 B1	20-02-2001	DE 19855683 A1	17-06-1999
		EP 0924500 A2	23-06-1999
		JP 3403099 B2	06-05-2003
		JP 11237281 A	31-08-1999
		SG 71178 A1	20-08-2003
		TW 401510 B	11-08-2000
		US 2001010308 A1	02-08-2001